

# Richard P. Feynman

*laureat al Premiului Nobel*



fun,da'mental

## QED

strania teorie despre  
lumină și materie

PERG  MENT



*Richard P. Feynman*

---

QED

strania teorie despre  
lumină și materie

*traducere de Valentin Stoica*



București, 2007



Coperta și tehnoredactarea: Valentin Stoica  
Ilustrația copertei: Rembrandt Harmenszoon van Rijn,  
*Filosof meditând* (detaliu),  
ulei pe lemn, circa 1632, 28 × 34 cm,  
Muzeul Luvru, Paris  
Redactor: Ioana Stoica

Richard P. Feynman, *QED: the strange theory of light and matter*  
©2007 by Richard P. Feynman

©2007 Editura Pergament

Toate drepturile prezentei ediții sunt rezervate Editurii Pergament.  
Reproducerea și transmiterea acestei cărți în parte ori în întregime, de  
orice natură și prin orice fel de mijloace, fie ele electronice sau  
mecanice, inclusiv prin fotocopiare, prin înregistrare ori prin sisteme  
de stocare și prelucrare a datelor, precum și vânzarea și/sau distribuția,  
pot fi făcute numai cu acordul scris al editurii.

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**  
**FEYNMAN, RICHARD P.**

**QED : strania teorie despre lumină și materie /**  
Richard P. Feynman. - București : Pergament, 2007  
ISBN 978-973-85481-2-1

530.145  
537.8

**S.C. PERGAMENT S.R.L.**

Înregistrată la Registrul Comerțului cu numărul J40/5359/30.05.2001

Sediul: București, sector 1

blvd. Ion Mihalache, nr. 337

bl. 14, sc. A, et. 2, ap. 12

Telefon: (004) 021 665 6050 / 0722 278 883

e-mail: valentin4143@gmail.com

Richard Phillips Feynman a fost unul dintre cei mai străluciți fizicieni teoreticieni și unul din gânditorii cei mai originali ai secolului care s-a încheiat. Născut în Far Rockaway, statul New York, pe data de 11 mai 1918, el a studiat la Massachusetts Institute of Technology, unde și-a dat examenul de licență în științe în anul 1939. A continuat apoi studiile la Princeton, unde și-a susținut lucrarea de doctorat în 1942. În timpul celui de-al Doilea Război Mondial, a lucrat la Los Alamos Scientific Laboratory. A devenit după aceea profesor de fizică teoretică la Cornell University, unde a lucrat alături de Hans Bethe.

Profesorul Feynman a reconstruit literalmente din temelii teoria electrodinamicii cuantice, fapt pentru care i s-a decernat Premiul Nobel în anul 1965. Regulile sale de calcul simplificate au devenit unelte standard de analiză teoretică atât în domeniul electrodinamicii cuantice, cât și în cel al fizicii energiilor înalte. În anul 1950 s-a detașat ca profesor la California Institute of Technology, unde ulterior a și fost titularizat. Din 1959, a deținut catedra Richard Chace Tolman de fizică teoretică. A dovedit o abilitate extraordinară în a-și împărtăși cunoștințele de fizică publicului de orice nivel, și a fost un binecunoscut și îndrăgit conferențiar.

Richard P. Feynman s-a stins din viață pe data de 15 februarie 1988, în urma unei îndelungate suferințe. Profesorul Freeman Dyson, de la Institute for Advanced Study din Princeton, l-a caracterizat drept „cea mai originală minte a generației sale”, iar necrologul publicat în New York Times l-a descris ca fiind „probabil fizicianul teoretician cel mai strălucit, influent și iconoclast al generației postbelice”.



## CUPRINS

Cuvânt înainte, <i>de Leonard Mautner</i>	9
Prefață, <i>de Ralph Leighton</i>	11
Mulțumiri	13
1. Introducere	15
2. Fotonii: particule de lumină	47
3. Electronii și interacțiunile lor	89
4. Final deschis	137
Index	165





## CUVÂNT ÎNAINTE

Prelegerile Memorialul Alex G. Mautner au fost gândite în amintirea soției mele, Alix, care a murit în 1982. Deși cariera ei s-a desfășurat în domeniul literaturii engleze, Alix a nutrit un îndelungat și neclintit interes pentru multe domenii ale științei. Astfel, mi s-a părut potrivit să înființez o fundație cu numele ei, care să sprijine o serie anuală de prelegeri având ca obiectiv comunicarea, către un public inteligent și interesat, a spiritului și realizărilor științei.

Sunt încântat că Richard Feynman a fost de acord să susțină prima serie a acestor prelegeri. Prietenia noastră merge înapoi în timp până în urmă cu cincizeci și cinci de ani, pe vremea când copilăream în Far Rockaway, New York. Richard a cunoscut-o pe Alix vreme de aproximativ douăzeci și doi de ani, iar ea l-a îndemnat îndelung să realizeze o prezentare a fizicii particulelor mici, care să poată fi înțeleasă de ea și de alții fără pregătire de specialitate.

Pe lângă aceasta, aș dori să îmi exprim stima față de cei care au contribuit la Fondul Alix G. Mautner, și care astfel au ajutat la a face posibile aceste prelegeri.

Leonard Mautner  
Los Angeles, California  
Mai, 1983



## PREFATĂ

Richard Feynman este legendar în lumea fizicii pentru modul lui de a privi lumea: neluând nimic de bun, și explicându-și totdeauna sieși lucrurile, el atinge adesea o nouă și profundă înțelegere a comportării naturii – cu o manieră proaspătă și elegantă de a o descrie.

El este de asemenea cunoscut pentru entuziasmul cu care le explică studenților fizica. Contrar faptului că a refuzat nenumărate oferte de a ține discursuri la prestigioase societăți și organizații, Feynman se dă în vânt după situațiile în care un student vine la el în birou și îl roagă să participe la întrunirile organizate de către clubul de fizică al colegiului.

Această carte reprezintă o întreprindere care, din câte știu eu, nu a mai fost încercată niciodată. Este o explicare simplă, directă, a unui subiect cât se poate de dificil – teoria electrodinamicii cuantice – pentru un public fără pregătire matematică. Ea este gândită să ofere cititorului interesat o idee asupra genului de raționament la care au recurs fizicienii pentru a explica modul în care se comportă natura.

Dacă intenționați să studiați fizica (sau o faceți deja), nu există nimic în această carte care să trebuiască a fi „dezvățat”: este o descriere completă, exactă în cel mai mic detaliu, a unui cadru conceptual pe care pot fi grefate fără nicio modificare diferite noțiuni mai avansate. Pentru cei dintre dumneavoastră care deja au studiat fizica, ea este o revelație cu privire la ceea ce făceați *propriu-zis* atunci când efectuați toate acele calcule complicate!

În copilărie, Richard Feynman a fost impulsionat să studieze analiza matematică de către o carte care începea astfel: „Ceea ce poate face un neghiob, poate face și un altul.” El ar dori să dedice această carte

cititorilor săi, cu niște cuvinte asemănătoare: „Ceea ce poate înțelege un neghiob, poate înțelege și un altul.“

Ralph Leighton  
Pasadena, California  
Februarie, 1985

## MULȚUMIRI

Această carte se dorește a fi o prelungire a prelegerilor pe tema electrodinamicii cuantice, pe care le-am susținut la UCLA, transcrise și editate de bunul meu prieten, Ralph Leighton. De fapt, manuscrisul a suferit modificări considerabile. Experiența domnului Leighton în predare și scriitură a fost de real folos în această încercare de a prezenta unui public larg un domeniu central al fizicii.

Multe expozițiuni de „popularizare” a științei își câștigă aparenta simplitate doar descriind ceva diferit, ceva considerabil distorsionat față de ceea ce pretind a descrie. Respectul nostru față de subiect nu ne-a permis să facem acesta. De-a lungul multor ore de discuții, am încercat să dobândim maximum de claritate și simplitate, fără a compromite adevărul prin distorsionare.



# 1

## INTRODUCERE

Alix Mautner a fost foarte curioasă în ceea ce privește fizica, și mi-a cerut adesea să-i explic unele lucruri. Aș fi făcut-o cu brio, așa cum o fac atunci când un grup de studenți de la Caltech se prezintă la mine la ora de consultații de joia, dar, în final, aș fi dat chix atunci când aș fi ajuns la partea pe care eu o consider cea mai interesantă: ne-am fi împotmolit în ideile nebunești ale mecanicii cuantice. I-am spus că n-aș putea să-i explic aceste idei într-o oră sau într-o seară – mi-ar lua mult timp – dar i-am promis că într-o bună zi voi pregăti o serie de prelegeri pe această temă.

Am pregătit câteva prelegeri și m-am dus în Noua Zeelandă, să le încerc – cum Noua Zeelandă este foarte departe, dacă ele nu ar fi avut succes, lucrurile ar fi fost în regulă! Ei bine, cei din Noua Zeelandă au considerat că ele sunt OK, deci bănuiesc că așa și sunt – cel puțin pentru Noua Zeelandă! Așa încât, iată prelegerile pe care le-am pregătit pentru Alix, însă, din nefericire, nu i le pot prezenta acum direct.

Doresc să vă vorbesc despre o parte a fizicii care este *cunoscută*, nu despre una necunoscută. Lumea întreabă mereu despre ultimele cuceriri în privința unificării cutărei teorii cu cutare teorie, și nu ne acordă șansa să le spunem câte ceva despre teoriile pe care le știm binișor. Ei vor întotdeauna să afle lucruri pe care noi nu le știm. Așa încât, în loc să vă zăpăcesc cu o grămadă de teorii nepuse la punct și analizate doar parțial, aș dori să vă vorbesc despre un subiect care a fost foarte amănunțit analizat. Iubesc acest domeniu al fizicii și consider că este unul încântător: el se numește electrodinamică cuantică, sau, pe scurt, QED [*quantum electrodynamics*, în engleză, în original (n.t.)].



Scopul meu principal pe parcursul acestor prelegeri, este de a descrie, cât mai exact cu putință, strania teorie despre lumină și materie – sau, mai precis, interacțiunea luminii cu electronii. Îmi va lua mult timp să vă explic toate lucrurile pe care intenționez să le prezint. Totuși, este vorba de patru prelegeri, așa încât n-am să mă grăbesc, și o s-o scoatem la capăt cu bine.

Trecutul fizicii este cunoscut ca o istorie a sintetizării multor fenomene într-un număr restrâns de teorii. De exemplu, în zilele de început, existau fenomene mecanice și fenomene termice; fenomene acustice, optice și gravitaționale. Dar, după ce Sir Isaac Newton a explicat legile mișcării, s-a descoperit curând că unele din aceste chestiuni aparent deosebite erau aspecte ale aceluiași lucru. De pildă, fenomenele acustice puteau fi complet înțelese ca mișcare a atomilor aerului. Deci sunetul nu a mai fost considerat drept ceva suplimentar mecanicii. S-a descoperit, de asemenea, că și fenomenele termice pot fi ușor înțelese pornind de la legile mișcării. Astfel, porțiuni mari ale teoriei fizice au fost sintetizate într-o teorie simplificată. Pe de altă parte, teoria gravitației nu poate fi înțeleasă pornind de la legile mișcării, și chiar și astăzi ea stă izolată de celelalte teorii. Până în momentul de față, gravitația nu poate fi înțeleasă în termeni de alte fenomene.

După sinteza fenomenelor mecanice, acustice și termice, a urmat descoperirea unui număr de fenomene pe care le numim electrice și magnetice. În 1873, acestea au fost sintetizate într-o singură teorie, dimpreună cu fenomenele optice, de către James Clerk Maxwell, care a avansat ipoteza că lumina este o undă electromagnetică. Deci, la acea vreme, existau legile mecanicii, legile electricității și magnetismului, și legile gravitației.

În jurul anului 1900, a fost dezvoltată o teorie care să explice ce este materia. Ea a fost numită teoria electronică a materiei, și afirmă că în interiorul atomilor există mici particule încărcate cu sarcină electrică. Această teorie a evoluat treptat, până la a include în ea noțiunea de nucleu greu înconjurat de electroni.

Încercările de a înțelege mișcarea electronilor în jurul nucleului folosind legile mecanicii – în mod analog modului în care Newton s-a folosit de ele pentru a determina maniera Pământului de a se învârti în jurul Soarelui – au fost un real eșec: tot felul de predicții au ieșit prost. (Ca un fapt divers, teoria relativității, despre care știți cu toții că a reprezentat o mare revoluție în fizică, a fost și ea descoperită tot cam pe atunci. Însă, prin comparație cu realizarea faptului că în cadrul

atomilor Principiile lui Newton erau cât se poate de false, teoria relativității nu a constituit decât o schimbare minoră.) Punerea la punct a unui alt sistem, care să înlocuiască legile mecanicii, a luat mult timp, pentru că fenomenele de la nivel atomic sunt deosebit de stranii. Pentru a se putea percepe ceea ce se întâmplă la acest nivel, a fost nevoie să se renunțe la bunul-simț. În cele din urmă, în 1926, a fost elaborată o teorie „lipsită de bun-simț”, care să explice „noul tip de comportament” al electronilor în cadrul materiei. Arăta cam tembel, dar în realitate nu era așa: ea a fost numită mecanică cuantică. Cuvântul „cuantă” se referă la acest aspect bizar al naturii, care contrazice bunul-simț. Tocmai despre acest aspect am să vă vorbesc eu.

Teoria mecanicii cuantice a explicat, de asemenea, tot felul de amănunte, cum ar fi motivul pentru care un atom de oxigen se combină cu doi atomi de hidrogen pentru a forma o moleculă de apă, și așa mai departe. Astfel, mecanica cuantică a furnizat teoria care se ascunde în spatele chimiei. Deci, chimia teoretică fundamentală înseamnă de fapt fizică.

Datorită faptului că teoria mecanicii cuantice a putut explica toată chimia și diversele proprietăți ale substanțelor, ea a constituit un succes răsunător. Dar mai rămânea problema interacțiunii luminii cu materia. Adică, teoria lui Maxwell referitoare la electromagnetism trebuia modificată pentru a veni în acord cu noile principii care fuseseră formulate pentru mecanica cuantică. Astfel, în 1929, un număr de fizicieni au dezvoltat o nouă teorie, teoria cuantică a interacțiunii luminii cu materia, care este denumită cu oribila titulatură de „electrodinamică cuantică”.

Dar teoria întâmpina necazuri. În cazul în care calculai ceva în linii mari, ea furniza rezultate rezonabile. Dar dacă încercai să faci calcule mai exacte, descopereai că micile corecții pe care te așteptai să le aduci (de exemplu, următorul termen dintr-o serie) erau de fapt foarte mari – în fapt, erau *infinite*! Se dovedea deci, că dincolo de o anumită precizie, nu puteai calcula efectiv *nimic*.

Apropo, ceea ce tocmai am punctat, reprezintă ceea ce eu numesc „o istorie a fizicii văzută de un fizician”, care nu este niciodată corectă. Ceea ce vă spun eu acum este genul de poveste-mitologie convențională, pe care fizicienii o spun studenților lor, iar acei studenți o spun studenților lor, și care nu are neapărat legătură cu dezvoltarea istorică propriu-zisă, pe care eu nu o cunosc!

În orice caz, pentru a continua cu această „istorie”, Paul Dirac, utilizând teoria relativității, a realizat o teorie relativistă a electronului, care nu lua complet în discuție toate efectele interacțiunii electronilor

cu lumina. Teoria lui Dirac susținea că electronul prezintă un moment magnetic – ceva cam ca forța unui mic magnet – a cărui tărie, exprimată în anumite unități de măsură, are exact valoarea 1. Apoi, pe la 1948, s-a descoperit experimental că valoarea efectivă era mai aproape de 1,00118 (cu o marjă de eroare de aproximativ 3 pentru ultima zecimală). Desigur, se știa că electronii interacționează cu lumina, deci o ușoară corecție era de așteptat. De asemenea, era de așteptat ca această corecție să poată fi înțeleasă pornind de la noua teorie a electrodinamicii cuantice. Însă, atunci când s-a calculat, în loc de 1,00118, rezultatul a fost infinit – ceea ce, din punct de vedere experimental, este greșit!

Ei bine, problema modului de a calcula lucrurile în cadrul electrodinamicii cuantice a fost tranșată în jurul anului 1948, de către Julian Schwinger, Sin-Itiro Tomonaga, și de mine. Schwinger a fost primul care a calculat această corecție, folosindu-se de un nou fel de „joc de alba-neagra”; valoarea teoretică obținută de el a fost aproximativ 1,00116, suficient de aproape de cea experimentală pentru a ne indica faptul că ne aflăm pe drumul cel bun. Dispuneam, în sfârșit, de o teorie cuantică a electricității și magnetismului cu care să putem calcula! Aceasta este teoria pe care v-o voi descrie.

Teoria electrodinamicii cuantice durează deja de mai bine de cincizeci de ani, și a fost testată cu tot mai multă acuratețe, pentru o gamă tot mai largă de condiții. În prezent, pot să afirm cu mândrie că nu există *nicio diferență semnificativă* între experiment și teorie!

Doar ca să vă faceți o idee despre modul în care teoria a fost trecută prin ciur și prin dârmon, am să vă ofer niște valori recente: experimentele au stabilit numărul lui Dirac la 1,00115965221 (cu o eroare de aproximativ 4 pentru ultima cifră zecimală); teoria ne dă 1,00115965246 (cu o marjă de circa cinci ori mai mare). Pentru a vă da seama de gradul de precizie al acestor măsurători, vă spun așa: dacă ar fi să măsurați distanța de la Los Angeles la New York cu această exactitate, ar însemna să nu greșiți cu mai mult de grosimea unui fir de păr; așa de fin a fost verificată electrodinamica cuantică în ultimii cincizeci de ani – atât din punct de vedere teoretic, cât și experimental. Apropo, eu am ales doar o valoare pe care să v-o prezint, dar există și alte lucruri în cadrul electrodinamicii cuantice care au fost măsurate cu o precizie asemănătoare, și care concordă și ele foarte bine cu teoria. Au fost verificate lucruri ce se întind pe un domeniu care începe de la o sută de ori dimensiunea Pământului și se sfârșește la a suta parte din dimensiunea nucleului atomic. Aceste valori sunt menite să vă intimideze, pentru a vă convinge că probabil teoria nu este prea

deplasată! Către final, am să vă descriu modul în care sunt realizate aceste determinări.

Aș dori să vă impresionez o dată în plus cu vastul domeniu de fenomene pe care le descrie teoria electrodinamicii cuantice. Este mai ușor de afirmat invers: teoria descrie *toate* fenomenele lumii fizice, cu excepția efectului gravitației, chestia aceea care vă ține în clipa de față pe scaune (de fapt, cred că aici este vorba de o combinație între gravitație și politețe), și a fenomenelor legate de radioactivitate, ce implică trecerea nucleelor de pe un nivel energetic pe altul. Deci, dacă lăsăm deoparte gravitația și radioactivitatea (mai corect spus, fizica nucleară), cu ce mai rămânem? Benzina arzând în motoarele automobilelor, spuma și baloanele de săpun, duritatea sării sau a cuprului, rigiditatea oțelului. În fapt, biologii încearcă să interpreteze în termeni de chimie cât pot de multe lucruri referitoare la viață și, așa cum v-am spus deja, teoria din spatele chimiei este electrodinamica cuantică.

Trebuie să clarific ceva: atunci când afirm că toate fenomenele lumii fizice pot fi explicate de această teorie, nu înseamnă că noi chiar știm asta. Majoritatea fenomenelor ce ne sunt familiare implică numere atât de *copleșitoare* de electroni, încât este greu pentru săracele noastre minți să urmărească această complexitate. În asemenea situații, putem folosi teoria pentru a realiza, în linii mari, ce ar trebui să se întâmple; și, în linii mari, în aceste condiții, chiar asta se întâmplă. Dar, dacă realizăm în laborator un experiment care implică doar *câțiva* electroni, în circumstanțe *simple*, atunci putem calcula foarte exact ce ar trebui să se întâmple și, de asemenea, putem măsura aceasta foarte precis. Ori de câte ori efectuăm astfel de experimente, teoria electrodinamicii cuantice funcționează foarte bine.

Noi, fizicienii, verificăm tot timpul pentru a vedea dacă nu cumva sunt probleme cu teoria. Așa merg treburile, căci dacă sunt probleme cu teoria, este interesant! Dar până acum nu am găsit nimic în neregulă cu teoria electrodinamicii cuantice. Ca atare, aș spune că ea este giuvierul fizicii – cea mai mândră posesiune a noastră.

Teoria electrodinamicii cuantice reprezintă, de asemenea, și prototipul pentru noi teorii, care încearcă să explice fenomenele nucleare, lucrurile ce se petrec în interiorul nucleelor atomilor. Dacă lumea fizică ar fi gândită ca o scenă, atunci actorii nu ar fi numai electronii, care se găsesc în afara nucleului atomic, ci și quarkurile și gluonii și celelalte particule – zeci de feluri – din interiorul nucleului. Și deși acești „actori” par cât se poate de diferiți unii de alții, ei se

comportă toți într-un anumit fel – un fel straniu și ciudat – maniera „cuantică”. La final, vă voi vorbi un pic despre particulele nucleare. Între timp, pentru a nu ne complica, am să vă vorbesc doar despre fotoni – particulele de lumină – și despre electroni. Pentru că ceea ce este important este *modul* în care aceștia se comportă, iar acest mod este foarte interesant.

Deci, acum știți despre ce am să vă vorbesc. Următoarea întrebare este: veți *înțelege* oare ceea ce vă voi spune? Oricine vine la o prelegere științifică, știe că n-o va înțelege, dar poate că cel care o susține are o cravată frumos colorată la care să te uiți. Nu și în acest caz! (Feynman nu poartă cravată.)

Ceea ce am să vă spun, reprezintă lucrurile pe care le predăm studenților noștri de la fizică în anul trei sau patru de facultate... și dumneavoastră vă închipuiți că eu am să vă explic astfel încât să puteți înțelege? Nu, n-o să fiți în stare să înțelegeți. Și atunci, de ce să mai stați să pierdeți timpul aici, dacă tot n-o să fiți în stare să înțelegeți ce am să vă spun? Revine în sarcina mea să vă conving să *nu* dați bir cu fugiții pe motiv că nu înțelegeți. Vedeți dumneavoastră, nici studenții mei nu înțeleg. Asta din cauză că nici *eu* nu înțeleg. Nimeni nu înțelege.

Aș dori să vorbesc un pic despre înțelegere. Atunci când se ține o prelegere, există multe motive pentru care s-ar putea să nu-l înțelegeți pe vorbitor. Unul ar fi acela că el se exprimă prost – nu spune ce ar vrea să spună, sau o spune alambicat – și este greu de urmărit. Aceasta este o chestiune mai degrabă trivială, iar eu îmi voi da toată silința să evit pe cât posibil accentul meu de New York.

Un alt motiv, mai ales dacă vorbitorul este fizician, ar putea fi acela că el folosește cuvinte obișnuite într-o manieră ciudată. Fizicienii folosesc adesea cuvinte obișnuite precum „lucru mecanic” [*work* = *muncă*, în engleză, în original (n.t.)], ori „acțiune”, ori „energie”, sau chiar, așa cum veți vedea, „lumină”, cu cine știe ce înțelesuri tehnice. Așa încât, atunci când vorbesc despre „muncă” în cadrul fizicii, nu mă refer la același lucru cu „munca” din jurul nostru. Pe parcursul acestei prelegeri, s-ar putea să folosesc unul din aceste cuvinte, fără să bag de seamă că l-am utilizat în această manieră neobișnuită. Voi face tot posibilul să mă controlez – sunt deformații profesionale – dar este vorba de o greșală ce poate fi făcută foarte ușor.

Următorul motiv pentru care ați putea crede că nu înțelegeți ceea ce vă spun, este acela că, în vreme ce eu v-aș descrie *cum* funcționează natura, dumneavoastră să nu pricepeți *de ce* funcționează ea



așa. Nu vă pot explica motivul pentru care natura se comportă în acest mod ciudat.

În fine, există și această posibilitate: după ce eu vă spun ceva, dumneavoastră să nu vă vină pur și simplu să credeți. Să nu puteți accepta așa ceva. Să nu vă placă. Să vi se lase o perdea și să nu mai urmăriți. Eu vă voi descrie cum arată natura – iar dacă dumneavoastră vă va dispăcea, lucrul acesta va sta în calea înțelegerii. Este o problemă cu care fizicienii au învățat cum să se împace: chestiunea esențială *nu* este dacă le place sau nu le place lor o teorie. Mai degrabă, este dacă teoria oferă sau nu predicții care să concorde cu experimentul. Nu se pune problema dacă o teorie este sau nu încântătoare din punct de vedere filosofic, sau dacă este ușor de înțeles, sau dacă este absolut rezonabilă din perspectiva bunului-simț. Din acest punct de vedere, teoria electrodinamicii cuantice descrie natura ca fiind absurdă. Dar concordă totalmente cu experimentul. Astfel încât sper că veți accepta natura așa cum este ea – absurdă.

Îmi va face plăcere să vă vorbesc despre această absurditate, deoarece eu o găsesc încântătoare. Vă rog să nu vă întoarceți gândul de la ea din cauză că nu puteți crede că natura este atât de stranie. Pur și simplu ascultați-mă, și cred că la final veți fi la fel de încântați ca mine.

Cum am să vă explic dumneavoastră lucrurile pe care nu le explic nici măcar studenților mei mai înainte ca ei să ajungă în anul trei de facultate? Dați-mi voie să vă lămuresc printr-o analogie. Indienii Maya se preocupau de răsăritul și de apusul planetei Venus ca de o „stea” de dimineață și o „stea” de seară – erau foarte interesați de momentul la care urma ea să apară pe cer. După ani de observații, ei au sesizat că cinci cicluri ale lui Venus corespundeau aproape exact la opt „ani normali” de-ai lor, de câte 365 de zile (cunoșteau și că anul real, cel cu anotimpurile, era ușor diferit, și îl determinaseră și pe acesta). Pentru a calcula, ei au inventat un sistem de bare și puncte pentru a reprezenta numerele (inclusiv pe zero), și dispuneau de reguli de calcul pentru prezicerea nu numai a răsăritului și apusului lui Venus, ci și a altor fenomene cerești, cum ar fi eclipsele de lună.

Pe atunci, doar câțiva preoți Maya puteau efectua astfel de calcule laborioase. Acuma, să presupunem că l-ați fi întrebat pe unul din ei cum se face unul doar din pașii procesului de predicție a momentului în care Venus răsare ca stea de dimineață – anume, scăderea a două numere. Și, contrar zilelor noastre, să presupunem că

nu ați fi mers la școală și că nu ați ști să scădeți. Cum v-ar fi explicat preotul ce anume este scăderea?

Fie v-ar fi putut învăța numerele reprezentate de bare și puncte și regulile de „scădere” a lor, fie v-ar fi putut spune ce face propriu-zis: „Să zicem că vrem să scădem 236 din 584; numărăm mai întâi 584 de boabe și le punem în oală; apoi scoatem 236 de boabe și le dăm deoparte; în cele din urmă, numărăm boabele rămase în oală; acel număr reprezintă rezultatul scăderii 584 fără 236.”

Ați putea exclama: „Pe Quetzalcoat-ul meu! Ce *salahorie* – să numeri boabe, să le pui în oală, să le scoți – halal slujbă!”

La care preotul v-ar putea replica: „De-aia avem regulile pentru bare și puncte. Regulile sunt complicate, dar reprezintă un mod mult mai eficient de a obține răspunsul decât număratul boabelor. Lucrul important este acela că, atât cât privește *răspunsul*, nu contează: se poate prevedea apariția lui Venus numărând boabe (ceea ce este lent, dar ușor de înțeles), sau folosind reguli complicate (ceea ce este mult mai rapid, dar necesită să-ți petreci mulți ani la școală pentru a le învăța).”

Realmente nu este greu să înțelegeți *cum* funcționează scăderea... atâta timp cât nu trebuie să o efectuați propriu-zis. Aceasta este poziția mea: vă voi explica ce *fac* fizicienii atunci când prezic modul în care urmează să se comporte natura, dar nu vă voi învăța nicio șmecherie prin care dumneavoastră să o puteți face *în mod eficient*. Veți descoperi că, pentru a face orice predicție rezonabilă cu ajutorul acestei noi scheme a electrodinamicii cuantice, va trebui să trasați o puzderie de săgetuțe pe foaia de hârtie. Durează șapte ani – patru ani de studii universitare și trei de studii postuniversitare – să-i antrenăm pe studenții noștri de la fizică să facă acest lucru într-o manieră complicată, eficientă. Vom sări aici peste șapte ani de educație în fizică: explicându-vă electrodinamica cuantică în termeni de ceea ce *facem propriu-zis*, eu sper ca dumneavoastră să fiți în stare să o înțelegeți mai bine decât unii din studenții noștri!

Extinzând exemplul cu indienii Maya un pas mai departe, l-ați putea întreba pe preot *de ce* cinci cicluri ale lui Venus sunt aproximativ egale cu 2920 de zile, sau opt ani. Ar putea exista tot felul de teorii referitoare la *motivul* acesta, cum ar fi: „20 este un număr important în sistemul nostru de numerație, iar dacă împărți 2920 la 20, obții 146, care este cu o unitate mai mare decât un număr ce poate fi exprimat ca sumă de două pătrate în două feluri diferite, etc.” Dar acea teorie n-ar avea realmente nicio legătură cu Venus. În zilele noastre, am descoperit că astfel de teorii sunt inutile. Deci, încă o dată,

nu ne vom ocupa de *motivul* pentru care natura se comportă în maniera ciudată în care o face; nu există teorii ca lumea care să explice aceasta.

Ceea ce am făcut până aici, a fost să vă introduc în atmosfera corespunzătoare pentru a mă urmări. În caz contrar, nu avem nicio şansă. Deci acum suntem gata, îi dăm drumul!

Începem cu lumina. Atunci când Newton a început să studieze lumina, primul lucru pe care l-a descoperit, a fost acela că ea reprezintă un amestec de culori. El a descompus lumina albă într-o varietate de culori, trecând-o printr-o prismă. Însă, atunci când a trecut, mai departe, lumina de o singură culoare – de exemplu, roșie – încă printr-o prismă, el a descoperit că aceasta nu putea fi separată mai mult de atât. Astfel, Newton a găsit că lumina albă este un amestec de diferite culori, fiecare din ele în stare pură, în sensul că ele nu pot fi descompuse la rândul lor.

(De fapt, o lumină de o culoare dată mai poate fi separată încă într-un anumit fel, în funcție de așa-numita „polarizare” a ei. Acest aspect în legătură cu lumina nu este vital pentru înțelegerea caracterului electrodinamicii cuantice, așa încât, pentru simplitate, nu îl voi lua în discuție... cu prețul de a nu vă oferi o descriere absolut completă a teoriei. Această ușoară simplificare nu va știrbi, în niciun fel, niciun pic din înțelegerea efectivă a lucrurilor despre care vă voi vorbi. Totuși, trebuie să fiu atent să menționez toate lucrurile pe care le voi omite.)

Atunci când pronunț cuvântul „lumină” pe parcursul acestor prelegeri, nu mă refer doar la lumina pe care o putem vedea, începând cu roșul și terminând cu albastrul. Se dovedește că lumina vizibilă reprezintă doar o parte a unei lungi scări, analoage unei game muzicale în care există și note muzicale mai ascuțite decât puteți dumneavoastră auzi, și altele mai joase decât puteți dumneavoastră auzi. Scara luminii poate fi descrisă prin numere – denumite frecvențe – și, pe măsură ce valorile lor cresc, lumina trece de la roșu la albastru, la violet, la ultraviolet... Noi nu putem vedea lumina ultravioletă, dar ea impresionează plăcile fotografice. E tot lumină – numai valoarea frecvenței este alta. (N-ar trebui să fim atât de nereceptivi: pe lume mai există și alte lucruri în afară de cele pe care le putem detecta în mod direct cu instrumentul nostru, ochiul.) Dacă pur și simplu modificăm în continuare valoarea numărului, pătrundem în domeniul razelor X, al razelor gamma, și așa mai departe. Dacă variem numărul în cealaltă



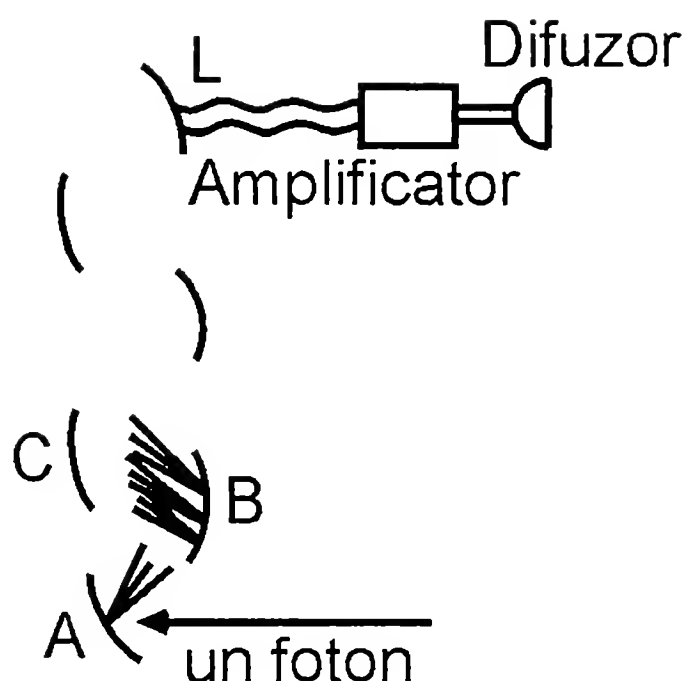
direcție, trecem de la albastru la roșu, la radiații infraroșii (căldură), la semnale de televiziune și la unde radio. Pentru mine, toate acestea înseamnă „lumină”. În majoritatea exemplelor pe care le voi da, voi folosi doar lumină roșie, dar teoria electrodinamicii cuantice se extinde asupra întregului domeniu pe care vi l-am descris, și reprezintă teoria din spatele tuturor acestor diverse fenomene.

Newton gândea că lumina este alcătuită din particule – el le numea „corpusculi” – și avea dreptate (însă raționamentul care îl condusesese la această concluzie era greșit). Noi știm că lumina este alcătuită din particule, pentru că avem la dispoziție un aparat foarte sensibil, care clicăie atunci când este iluminat, iar dacă iluminarea devine mai slabă, păcăniturile rămân la fel de tari... doar că mai rare. Ca atare, lumina este ceva precum picăturile de ploaie – fiecare mic bulgăr de lumină este numit foton – iar dacă lumina este toată de o singură culoare, toate „picăturile de ploaie” au aceeași dimensiune.

Ochiul omenesc este un aparat foarte bun: este nevoie numai de cinci sau șase fotoni pentru a activa o celulă nervoasă și a trimite un semnal către creier. Dacă am fi evoluat încă un pic, astfel încât văzul nostru să fie de zece ori mai sensibil, nu am mai fi stat acum să purtăm această discuție: cu toții am fi înregistrat lumina foarte slabă, de o singură culoare, ca pe o serie de mici scânteieri intermitente, cu intensități egale.

V-ați putea întreba cum să fie posibil de detectat un singur foton. Un aparat care poate face aceasta se numește fotomultiplicator, și vă voi descrie pe scurt cum funcționează el. Atunci când un foton lovește placa metalică A de jos (a se vedea Figura 1), el face ca un electron să scape din unul din atomii plăcii. Electronul liber este atras puternic de placa B (care are pe ea sarcini pozitive) și o lovește cu suficientă forță pentru a elibera trei sau patru alți electroni. Fiecare din electronii extrași din placa B este atras de placa C (care este, de asemenea, încărcată electric), și ciocnirile lor cu placa C generează încă și mai mulți electroni liberi. Acest proces se repetă de zece-douăsprezece ori, până când ultima placă, L, este lovită de milioane de electroni, ceea ce este suficient pentru a produce un curent electric sesizabil. Acest curent poate fi amplificat de către un amplificator obișnuit și trimis către un difuzor, care să producă păcănituri audibile. De fiecare dată când un foton de o culoare anume lovește fotomultiplicatorul, se aude un clic de tărie constantă.

Dacă așezați o grămadă de fotomultiplicatori de jur împrejur și faceți să se emită o lumină slabă în diverse direcții, aceasta pătrunde într-unul sau altul din fotomultiplicatori și produce un clic de



**Figura 1.** Un fotomultiplicator poate detecta un foton singular. Atunci când un foton lovește placa A, este extras un electron, iar acesta este atras de placa B, încărcată pozitiv, eliberând din ea mai mulți electroni. Procesul continuă până când miliarde de electroni lovesc ultima placă, L, și produc un curent electric, ce este amplificat într-un amplificator obișnuit. Dacă se conectează un difuzor la amplificator, se pot auzi clicuri cu tărie constantă, de fiecare dată când un foton de o culoare dată lovește placa A.

intensitate întreagă. Este totul sau nimic: dacă la un moment dat se declanșează unul din fotomultiplicatori, atunci niciun altul nu se va declanșa în acel moment (cu excepția rarei situații în care s-ar întâmpla ca doi fotoni să părăsească sursa de lumină în același timp). Nu există o despicare a luminii în „jumătăți de particulă”, care să o ia în direcții diferite.

Vreau să accentuez că lumina ne parvine sub această formă – ca particule. Este foarte important de știut că lumina se comportă ca niște particule, mai ales pentru aceia dintre dumneavoastră care ați urmat cursuri de fizică la școală, în care vi s-a spus probabil cum că ea s-ar comporta ca o undă. Eu *chiar* vă spun cum se comportă lumina – ca niște particule.

Ați putea afirma că la mijloc este doar fotomultiplicatorul, care detectează lumina ca pe particule; însă nu, orice aparat proiectat a fi suficient de sensibil pentru a detecta o lumină slabă, sfârșește invariabil prin a găsi același lucru: faptul că lumina este alcătuită din particule.

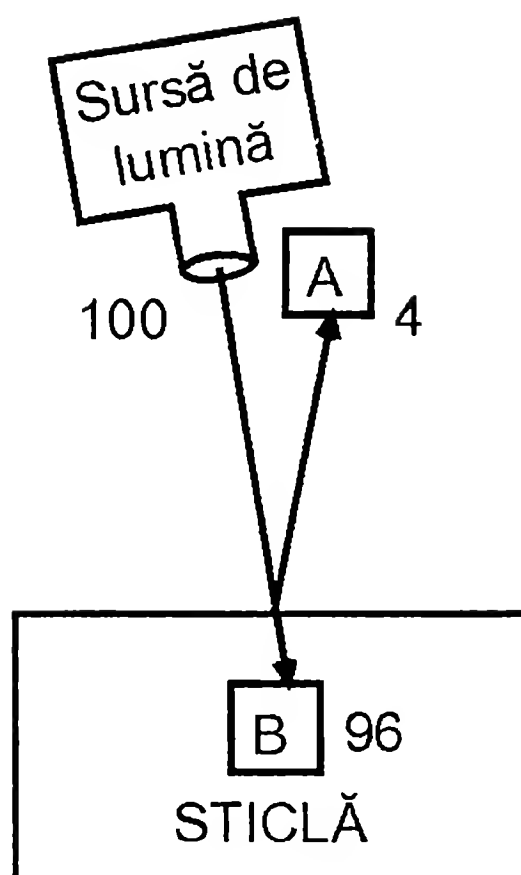
\* \* \*

Voi presupune că vă sunt foarte familiare proprietățile luminii în situațiile din viața de zi cu zi – lucruri precum acelea că lumina se propagă în linie dreaptă, că la intrarea în apă direcția luminii se frânge, că atunci când lumina este reflectată de o suprafață cum ar fi cea a unei oglinzi, unghiul sub care ea lovește acea suprafață este egal cu cel sub care părăsește suprafața, că lumina poate fi descompusă în culori, astfel încât, dacă pe suprafața unei băltoace este puțin ulei, se pot vedea culori minunate, că lentilele focalizează lumina, și așa mai departe. Voi utiliza aceste fenomene care vă sunt familiare, pentru a ilustra comportarea cu adevărat stranie a naturii; voi explica aceste fenomene în termeni ai teoriei electrodinamicii cuantice. V-am vorbit despre fotomultiplicator, pentru a ilustra un fenomen esențial, care s-ar putea să nu vă fie familiar – acela că lumina este alcătuită din particule – dar de acum sper că și acesta vă este familiar!

Acuma, eu cred că tuturor vă este familiar fenomenul prin care lumina este parțial reflectată de suprafețe precum cea a apei. Nu puține sunt tablourile în care lumina lunii se reflectă pe suprafața unui lac. (Și nu de puține ori ați intrat în bucluc *din cauza* luminii lunii care se reflecta pe suprafața unui lac.) Atunci când priviți în apă, puteți vedea ceea ce se găsește în adâncul ei (mai ales pe timpul zilei), dar puteți vedea, de asemenea, și o reflectare pe suprafața ei. Un alt exemplu îl constituie sticla: dacă aprindeți lumina în cameră pe timpul zilei, puteți vedea pe fereastră lucrurile de afară, dar și o slabă reflectare a lămpii din casă. Deci lumina este parțial reflectată de către suprafața geamului.

Înainte de a merge mai departe, doresc să fiți conștienți de o simplificare pe care o voi face, și pe care o voi corija mai încolo. Atunci când voi vorbi despre reflexia parțială a luminii pe sticlă, voi considera că lumina este reflectată doar de *suprafața* sticlei. În realitate, o bucată de geam reprezintă un monstru de complexitate – electroni într-un număr uriaș, vânzolindu-se de colo-colo. Atunci când pătrunde un foton, el interacționează cu electroni *de peste tot* din sticlă, nu doar cu cei de la suprafață. Fotonul și electronii se angajează într-un fel de dans, al cărui rezultat de ansamblu este același ca și când fotonul ar lovi numai suprafața. Așa încât, o vreme, dați-mi voie să fac această simplificare. Mai târziu, vă voi arăta ce se petrece efectiv în interiorul sticlei, astfel încât să puteți înțelege de ce rezultatul este același.

Acum aș dori să vă descriu un experiment și să vă comunic rezultatele lui surprinzătoare. În cadrul acestui experiment, câțiva fotoni de aceeași culoare – să zicem, lumină roșie – sunt emiși de către o sursă de lumină (a se vedea Figura 2) către un bloc de sticlă. În



**Figura 2.** Un experiment pentru măsurarea reflexiei parțiale a luminii pe suprafața singulară a sticlei. Pentru fiecare 100 de fotoni ce părăsesc sursa de lumină, 4 sunt reflectați de către suprafața superioară și sfârșesc în fotomultiplicatorul din punctul A, iar ceilalți 96 sunt transmiși de suprafață și sfârșesc în fotomultiplicatorul din B.

punctul A, deasupra sticlei, se plasează un fotomultiplicator, pentru a capta orice fotoni care vor fi fiind reflectați de suprafața superioară a sticlei. Pentru a măsura câți fotoni trec dincolo de această suprafață, în punctul B din interiorul sticlei se plasează un alt fotomultiplicator. Nu ne vom preocupa de dificultățile evidente ale introducerii unui fotomultiplicator într-un bloc de sticlă. Care va fi rezultatul experimentului?

Pentru fiecare 100 de fotoni care coboară drept spre sticlă la  $90^\circ$ , în medie 4 ajung în punctul A și 96 în B. Deci, în acest caz, „reflexia parțială” înseamnă că 4% din fotoni sunt reflectați de către suprafața superioară, în vreme ce ceilalți 96% sunt transmiși. *Deja* ne aflăm în mare încurcătură: cum poate fi lumina reflectată *parțial*? Fiecare foton sfârșește în punctul A sau în punctul B – cum „se hotărăște” fotonul dacă să o ia spre A sau spre B? (Publicul râde.) S-ar putea să sune ca o glumă, dar nu putem doar să stăm să râdem; o să trebuiască să explicăm aceasta în termeni ai unei teorii! Reflexia parțială constituie din start un mister adânc, și a reprezentat pentru Newton o problemă dificilă.

Există câteva teorii posibile care ar putea fi elaborate pentru a da socoteală de reflexia parțială a luminii pe sticlă. Una din ele este aceea că 96% din suprafața sticlei este „găurită”, lăsând să treacă

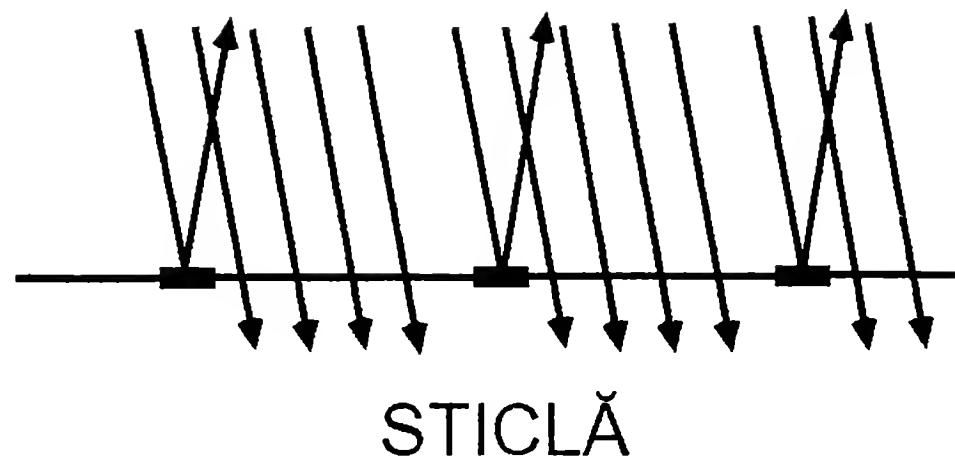
lumina, în timp ce 4% din suprafață este acoperită de mici „petice“ de material reflectător (a se vedea Figura 3). Newton și-a dat seama că aceasta nu constituie o explicație posibilă.<sup>1</sup> Vom întâlni imediat o trăsătură ciudată a reflexiei parțiale, care vă va scoate din minți dacă veți încerca să vă cramponați de o teorie cu „găuri și petice“ – sau de orice altă teorie rațională.

O altă posibilă teorie este aceea că fotonii au vreun soi de mecanism intern – „roțițe“ și „pinioane“ lăuntrice, care se angrenează cumva – astfel încât, atunci când un foton este „țintit“ exact cum trebuie, el trece prin sticlă, iar când nu este țintit ca lumea, se reflectă. Putem verifica această teorie, încercând să filtrăm fotonii care nu sunt țintiți cum trebuie, prin intercalarea câtorva straturi suplimentare de sticlă între sursă și primul strat. După trecerea prin filtre, fotonii care ar ajunge la suprafața sticlei ar fi *toți* țintiți cum trebuie, și nici unul din ei n-ar trebui să se reflecte. Necazul cu această teorie este că ea nu concordă cu experimentul: chiar și după ce trec prin multe straturi de sticlă, 4% din fotonii ce ajung la o anumită suprafață, se reflectă pe ea.

Oricât am încerca să inventăm o teorie rezonabilă care să explice cum „se hotărăște“ un foton dacă să o ia prin sticlă sau să ricoșeze de ea, este imposibil de prezis ce cale va alege fotonul. Filosofii au afirmat că dacă aceleași circumstanțe nu conduc mereu la aceleași rezultate, atunci predicțiile sunt imposibile și știința se va nărui. Iată o circumstanță – fotoni identici cad tot timpul pe aceeași bucată de sticlă, pe aceeași direcție – care generează rezultate diferite. Nu putem prezice dacă un foton va ajunge în A sau în B. Tot ce putem prezice, este că din 100 de fotoni care cad, o medie de 4 vor fi reflectați de suprafața superioară. Înseamnă oare aceasta că fizica, o știință de mare precizie, a fost redusă la a calcula doar *probabilitatea* unui eveniment, și nu la a prezice exact ceea ce se va întâmpla? Da. Acest lucru constituie un

---

<sup>1</sup> De unde știa? Newton a fost un foarte mare om de știință. El a scris: „din cauză că pot să lustruiesc sticla“. V-ați putea întreba: cum naiba putea el să-și dea seama că posibilitatea de a lustrui sticla însemna că nu avea cum să fie vorba de găuri și petice? Newton își lustruia singur lentilele și oglinzile, și știa ce făcea prin aceasta: zgâria suprafața sticlei cu pulberi abrazive din ce în ce mai fine. Pe măsură ce zgârieturile deveneau din ce în ce mai fine, aspectul sticlei se schimba de la un gri tern (din cauză că lumina era împrăștiată de zgârieturile groase), la o limpezime de cristal (pentru că zgârieturile extrem de fine lăsau lumina să treacă). Astfel, el a priceput că era imposibil de acceptat presupunerea că lumina ar putea fi afectată de neregularități foarte mici precum zgârieturile, ori găurile și peticele; în fapt, el a descoperit contrariul: cele mai fine zgârieturi și, în consecință, peticele la fel de mici, nu afectează lumina. Deci, teoria găurilor și peticelor era eronată.



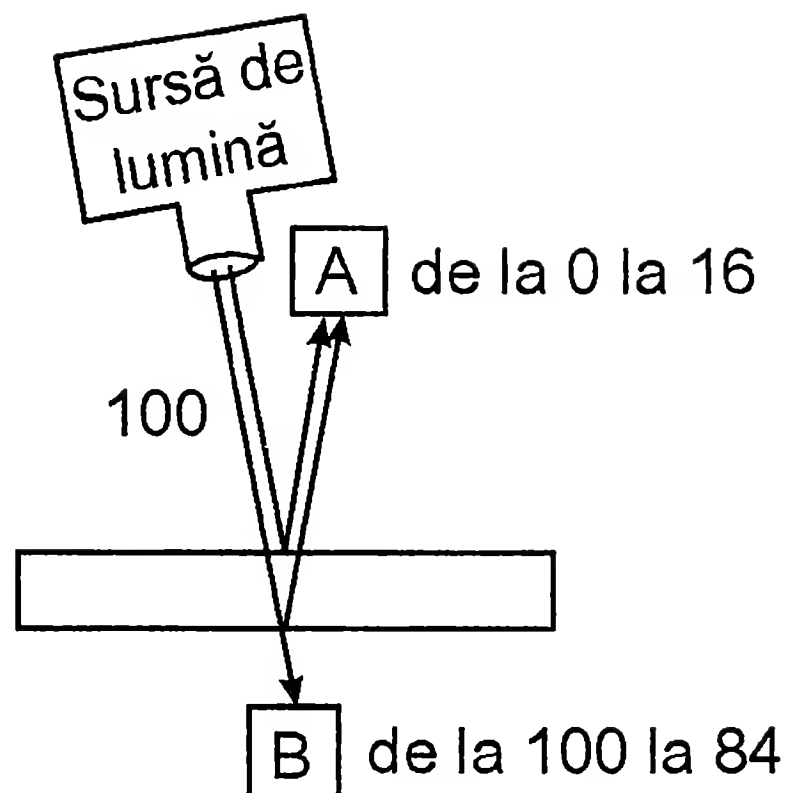
**Figura 3.** Una din teoriile care să explice reflexia parțială a luminii pe o suprafață singulară de sticlă, implică o suprafață alcătuită în principal din „găuri” ce lasă să treacă lumina, și câteva „petice” care o reflectă.

regres, dar asta-i situația. Natura ne permite să calculăm numai probabilități. Totuși, știința nu s-a năruit.

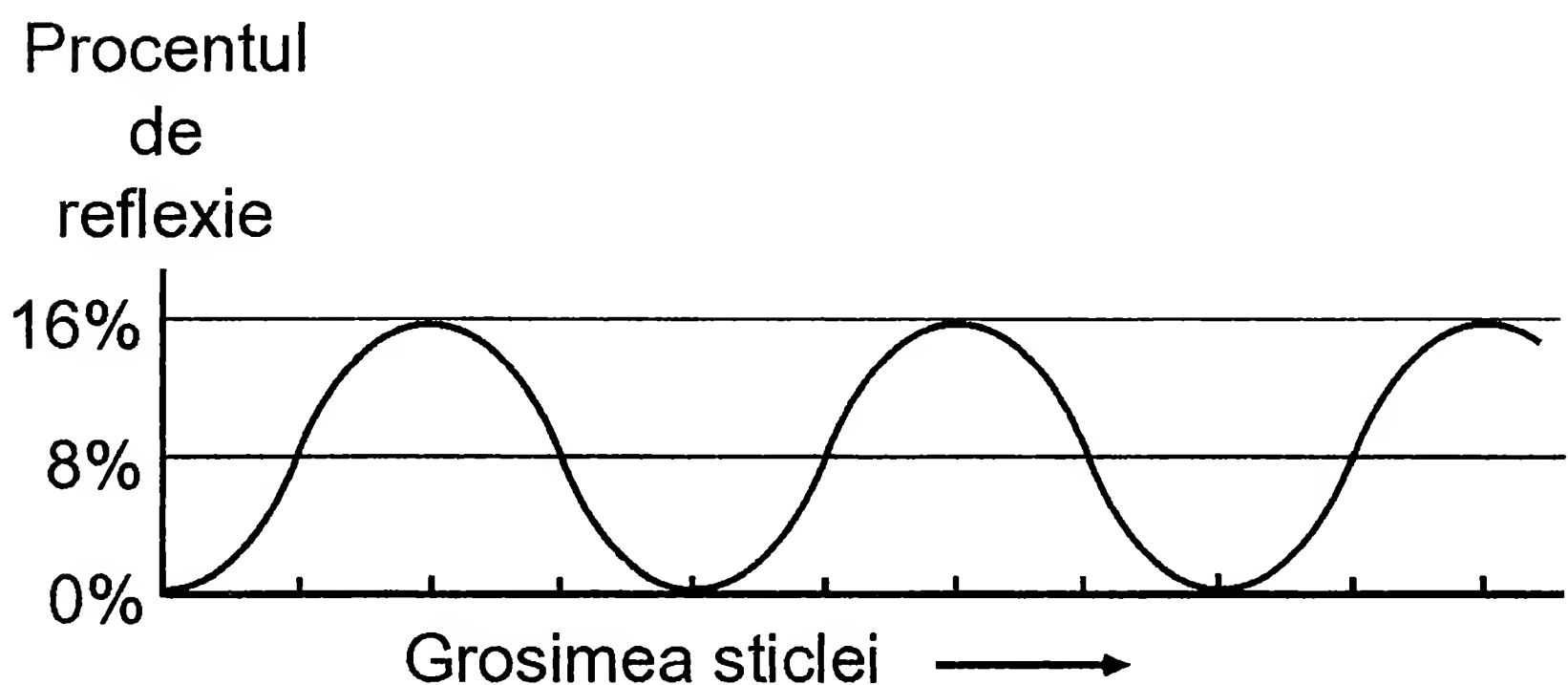
Dacă reflexia parțială a luminii pe o suprafață singulară reprezintă un mister adânc și o problemă dificilă, reflexia parțială pe două sau mai multe suprafețe este absolut aiuritoare. Dați-mi voie să vă arăt de ce. Vom face un al doilea experiment, în care vom măsura reflexia parțială a luminii pe două suprafețe. Înlocuim blocul de sticlă cu un strat foarte subțire de sticlă – cele două fețe ale lui sunt absolut paralele – și plasăm fotomultiplicatorul sub el, în dreptul sursei. De data aceasta, pentru a sfârși în punctul A, fotonii se pot reflecta fie pe fața superioară, fie pe cea inferioară; toți ceilalți vor sfârși în B (a se vedea Figura 4). Ne-am putea aștepta ca suprafața superioară să reflecte 4% din lumină, iar cea inferioară să reflecte 4% din cele 96 de procente rămase, totalizând astfel circa 8%. Deci, ar trebui să găsim că, din fiecare 100 de fotoni ce părăsesc sursa de lumină, în jur de 8 sosesc în punctul A.

Ceea ce se întâmplă de fapt în aceste condiții experimentale atent controlate, este că numărul de fotoni care ajung în punctul A este arareori 8 din 100. Cu anumite plăcuțe de sticlă, obținem în mod repetat 15 sau 16 fotoni – de două ori cât ne-am fi așteptat! Cu alte lame de sticlă, obținem regulat 1 sau 2 fotoni. Alte straturi prezintă o reflexie totală de 10%; altele elimină cu totul reflexia parțială! Oare ce anume ar putea sta la baza acestor rezultate nebunești? Dacă verificăm





**Figura 4.** Un experiment pentru măsurarea reflexiei parțiale a luminii pe două suprafețe de sticlă. Fotonii pot ajunge la fotomultiplicatorul din punctul A, reflectându-se fie pe suprafața superioară, fie pe suprafața inferioară a foitei de sticlă; în caz contrar, ei pot traversa ambele suprafețe și sfârșesc lovind fotomultiplicatorul din punctul B. În funcție de grosimea sticlei, la fotomultiplicatorul din A ajung între 0 și 16 fotoni din 100. Aceste rezultate ridică probleme pentru orice teorie rațională, inclusiv pentru cea din Figura 3. Pare că reflexia parțială poate fi „închisă” ori „amplificată” de prezența unei suprafețe adiționale.



**Figura 5.** Rezultatele unui experiment de măsurare atentă a relației dintre grosimea unei foite de sticlă și reflexia parțială, pun în evidență un fenomen numit „interferență”. Pe măsură ce grosimea sticlei crește, reflexia parțială urmează un ciclu de la zero la 16%, care se tot repetă, fără a da semne că s-ar estompa la un moment dat.

diferitele lame de sticlă în privința calității și uniformității lor, descoperim că ele diferă doar ca grosime, foarte puțin.

Pentru a verifica ideea potrivit căreia cantitatea de lumină reflectată de cele două suprafețe ar depinde de grosimea sticlei, haideți să facem o serie de experimente. Începând cu cel mai subțire strat de sticlă posibil, vom număra câți fotoni lovesc fotomultiplicatorul din punctul A de fiecare dată când 100 de fotoni părăsesc sursa de lumină. Apoi vom înlocui stratul de sticlă cu unul un pic mai gros, și vom face o nouă numărare. După ce vom fi repetat acest lucru de câteva zeci de ori, la ce rezultate vom fi ajungând?

În cazul celui mai subțire strat de sticlă posibil, găsim că numărul de fotoni care ajung în punctul A este totdeauna aproape zero – câteodată mai este și 1. Atunci când înlocuim stratul cel mai subțire cu unul un pic mai gros, descoperim o creștere a cantității de lumină reflectată – aproape de așteptatul 8%. Pe măsură ce continuăm înlocuirile cu straturi de sticlă încă și mai „groase” – am ajuns în acest moment undeva în jurul a o zecime de micron – cantitatea de lumină reflectată de cele două suprafețe atinge un maxim de 16%, iar apoi începe să scadă, trecând prin 8%, până înapoi la zero – dacă stratul de sticlă are fix o anumită grosime, reflexia dispare. (Încercați să gândiți *asta* prin prisma ideii de petice reflectătoare!)

Cu straturi de sticlă din ce în ce mai groase, reflexia parțială crește din nou până la 16% și apoi revine la zero – un ciclu care se repetă iar și iar (a se vedea Figura 5). Newton a descoperit aceste oscilații, și a efectuat un experiment care ar putea fi interpretat în mod corect numai în cazul în care ele ar continua pe parcursul a cel puțin 34.000 de cicluri! În zilele noastre, cu ajutorul laserelor (care produc o lumină foarte pură, monocromatică), putem observa că ciclul își păstrează tăria chiar și după mai mult de 100.000.000 de repetări – ceea ce corespunde unei grosimi a sticlei mai mari de 50 de metri. (În viața de zi cu zi nu vedem acest fenomen, din cauză că în mod normal sursele de lumină nu sunt monocromatice.)

Așadar, se vedește că predicția noastră de 8% este corectă ca o medie pe ansamblu (întrucât valoarea efectivă variază după un tipar regulat, între zero și 16%), însă ea nu concordă exact decât de două ori pe ciclu – asemenea unui ceas stricat, care arată ora exactă de două ori pe zi. Cum putem explica această trăsătură stranie a reflexiei parțiale, de a depinde de grosimea sticlei? Cum poate suprafața superioară să reflecte 4% din lumină (așa cum s-a confirmat în primul nostru experiment), când noi, așezând o a doua suprafață dedesubt, la exact distanța potrivită, putem cumva să „închidem” reflexia? Iar așezând



acea a doua suprafață la o distanță puțin diferită, putem să „amplificăm” reflexia până la 16%! S-ar putea oare ca suprafața inferioară să exercite vreun soi de influență ori efect asupra capacității suprafeței superioare de a reflecta lumina? Și dacă am introduce o *a treia* suprafață?

Cu o a treia suprafață, sau cu orice alt număr de suprafețe ulterioare, cantitatea de reflexie parțială se schimbă din nou. Ne pomenim aventurându-ne tot mai în jos, suprafață după suprafață, în încercarea noastră de a ajunge la suprafața ultimă. Trebuie oare să facă un foton așa ceva pentru a se „decide”, după cum afirmă teoria noastră, dacă să se reflecte sau nu pe prima suprafață?

Newton a avansat un număr de argumente ingenioase privitoare la această problemă,<sup>2</sup> dar, în final, și-a dat seama că încă nu dezvoltase o teorie satisfăcătoare.

Multă vreme după Newton, reflexia parțială pe două suprafețe a fost explicată, fără mari bătăi de cap, prin intermediul unei teorii a

<sup>2</sup> Este un lucru foarte norocos pentru noi faptul că Newton s-a convins pe sine că lumina reprezintă niște corpusculi, deoarece putem vedea astfel prin câte trebuie să treacă o minte proaspătă și inteligentă, ce studiază acest fenomen al reflexiei parțiale, în încercarea de a-l explica. (Cei ce au considerat că lumina este o undă, nu au fost niciodată nevoiți să se ia la trântă cu el.) Newton a argumentat după cum urmează. Deși lumina pare că este reflectată de către prima suprafață, nu se poate ca ea să fie reflectată de către aceasta. Dacă ar fi așa, atunci cum ar fi posibil ca ea să fie recapturată, în situația în care grosimea s-ar presupune că are o asemenea valoare încât să nu existe deloc reflexie? Deci lumina trebuie să fie reflectată de a doua suprafață. Iar pentru a da socoteală de faptul că grosimea sticlei determină cantitatea de reflexie parțială, Newton a propus următoarea idee: lumina care cade pe prima suprafață generează un soi de undă sau câmp, care călătorește alături de lumină, și care o predispune pe aceasta să se reflecte sau nu pe a doua suprafață. El a numit acest proces „toane de a se reflecta ușor sau de a se transmite ușor”, ele manifestându-se în cicluri, în funcție de grosimea sticlei.

Această idee prezintă două dificultăți. Prima o constituie efectul suprafețelor suplimentare – fiecare nouă suprafață afectează reflexia – pe care l-am descris în text. Cealaltă problemă este aceea că, în mod categoric, lumina se reflectă pe suprafața unui lac, care nu prezintă suprafață secundară. Deci lumina *trebuie* să se reflecte pe suprafața superioară. În cazul suprafețelor singulare, Newton a afirmat că lumina ar avea o predispoziție să se reflecte. Putem oare avea o teorie în care lumina să știe pe ce fel de suprafață cade, și dacă aceasta este sau nu singura?

Newton nu a insistat asupra acestor dificultăți legate de teoria sa privitoare la „toanele de a se reflecta și de a se transmite”, deși este limpede că știa că aceasta nu era satisfăcătoare. Pe vremea lui, dificultățile legate de o teorie erau rapid expediate și trecute cu vederea – un stil diferit de cel cu care suntem obișnuiți în știința de astăzi, în care noi scoatem în evidență locurile din teoriile noastre care nu se potrivesc cu observațiile experimentale. Nu caut să iau atitudine împotriva lui Newton; vreau doar să mă pronunț în favoarea modului în care comunicăm între noi în știința actuală.

undelor,<sup>3</sup> însă, în momentul în care au fost efectuate experimente cu lumină foarte slabă căzând pe fotomultiplicatori, teoria undelor s-a năruit: pe măsură ce lumina se tot diminua, fotomultiplicatorii continuau să producă clicuri la fel de tari – doar că mai puține. Lumina se comporta ca particulă.

Actualmente, situația este că nu avem la dispoziție un model viabil care să explice reflexia parțială pe două suprafețe: calculăm doar probabilitatea ca un fotomultiplicator oarecare să fie lovit de un foton reflectat de către o lamă de sticlă. Am ales acest calcul drept primul nostru exemplu cu privire la metoda oferită de teoria electrodinamicii cuantice. Vă voi arăta „cum numărăm noi boabele” – ce fac fizicienii pentru a obține răspunsul corect. Nu vă voi explica în ce mod se „decide” propriu-zis fotonul dacă să ricoșeze, sau să treacă mai departe; acest lucru nu este cunoscut. (Poate că întrebarea nu are sens.) Vă voi arăta doar cum să calculați *probabilitatea* corectă ca lumina să se reflecte pe sticla de o anumită grosime, căci acesta este singurul lucru pe care fizicienii știu să-l facă! Ceea ce facem pentru a obține răspunsul la *această* problemă este analog cu lucrurile pe care trebuie să le facem pentru a obține răspunsul la *orice* chestiune explicată prin intermediul electrodinamicii cuantice.

Pentru aceasta, țineți-vă bine – nu că ar fi greu de înțeles, dar este absolut ridicol – tot ce avem de făcut este să desenăm mici săgeți pe o foaie de hârtie; asta-i tot!

Acuma, ce legătură să aibă o săgeată cu șansa de a se întâmpla un anumit eveniment? Potrivit regulilor „după care numărăm boabele”,

---

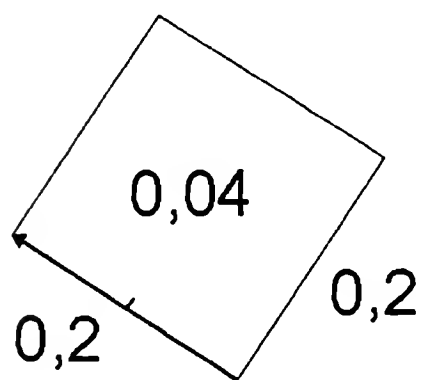
<sup>3</sup> Această idee făcea uz de faptul că undele pot conlucra sau se pot contracara reciproc, iar calculele bazate pe acest model concordau cu rezultatele experimentelor lui Newton, cum concordau de altfel și cu cele ale tuturor experimentelor efectuate vreme de sute de ani după el. Însă, în momentul în care au fost puse la punct aparate suficient de sensibile pentru a detecta un singur foton, teoria undelor prezicea că „păcăniturile” fotomultiplicatorului urmau să devină din ce în ce mai slabe, când, de fapt, ele își mențineau tăria – doar că se produceau din ce în ce mai rar. Nici un model rezonabil nu putea explica acest lucru, așa încât a existat o vreme în care trebuia să fii isteț: trebuia să știi ce experiment anume analizezi, ca să spui dacă lumina este undă sau particulă. Această stare de lucruri a fost denumită „dualismul undă-corpusul” al luminii, iar cineva a afirmat în derâdere că luna, miercurea și vinerea lumina era undă, marțea, joia și sâmbăta era particulă, iar duminica mai rămânea de văzut! Scopul acestor prelegeri este tocmai acela de a vă relata modul în care a fost „rezolvată” în cele din urmă această încurcătură.

probabilitatea unui eveniment este egală cu pătratul lungimii săgeții. De exemplu, în primul nostru experiment (atunci când am măsurat reflexia parțială numai pe suprafața superioară), probabilitatea ca un foton să ajungă la fotomultiplicatorul din punctul A era 4%. Aceasta corespunde unei săgeți a cărei lungime este 0,2, deoarece 0,2 ridicat la pătrat ne dă 0,04 (a se vedea Figura 6).

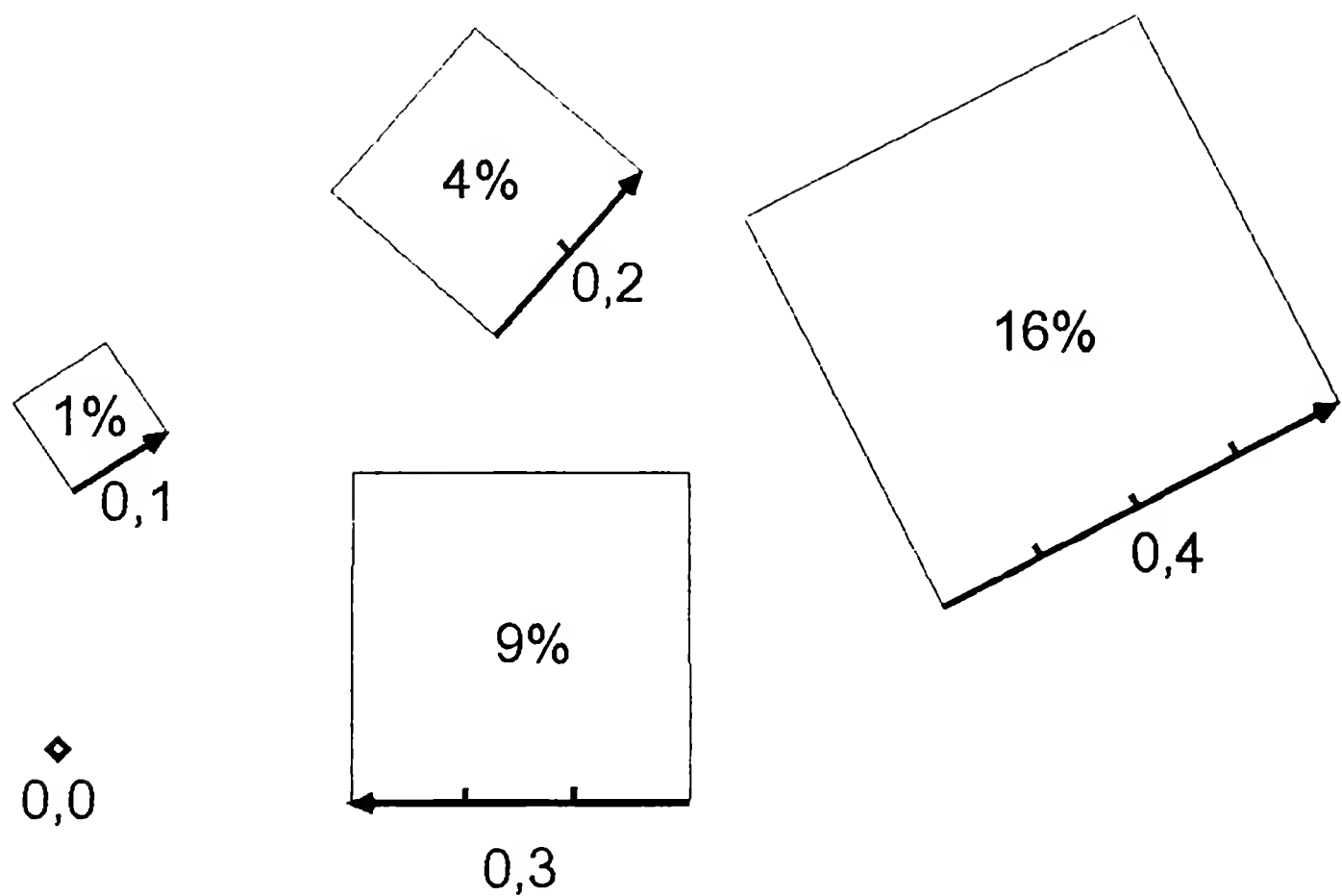
În al doilea experiment al nostru (atunci când înlocuiam lame mai subțiri de sticlă cu altele ceva mai groase), fotonii ajungeau în punctul A ricoșând fie de suprafața superioară, fie de cea inferioară. Cum să desenăm o săgeată care să corespundă acestei situații? Lungimea săgeții trebuie să aibă valori în domeniul de la zero la 0,4, pentru a reprezenta probabilitățile cuprinse între zero și 16%, în funcție de grosimea sticlei (a se vedea Figura 7).

Începem prin a considera diferitele moduri în care un foton ar putea ajunge de la sursă la fotomultiplicatorul din punctul A. Din moment ce consider simplificarea că lumina ricoșează fie de suprafața superioară, fie de cea inferioară, există două drumuri posibile pe care fotonul poate ajunge în punctul A. Ceea ce facem în acest caz este să desenăm *două* săgeți – câte una pentru fiecare mod în care se poate întâmpla evenimentul – și apoi să le combinăm într-o „săgeată finală”, al cărei pătrat să reprezinte probabilitatea evenimentului. Dacă ar fi existat trei moduri diferite în care s-ar fi putut întâmpla evenimentul, am fi desenat trei săgeți separate, după care le-am fi combinat.

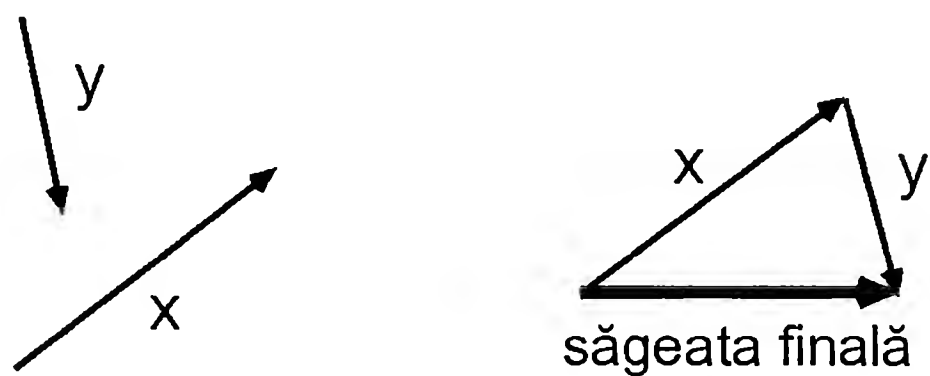
Dați-mi voie să vă arăt acum cum combinăm săgețile. Să zicem că vrem să combinăm săgeata x cu săgeata y (a se vedea Figura 8). Tot ce avem de făcut este să potrivim vârful lui x în dreptul cozii lui y (fără a schimba orientarea vreuneia din ele) și să desenăm săgeata finală, dinspre coada lui x către vârful lui y. Asta-i tot. În aceeași manieră putem combina oricâte săgeți (tehnica, se numește „adunare vectorială”). Fiecare săgeată vă spune cât de departe și în ce direcție să vă deplasați pe ocolite. Săgeata finală vă arată cum să ajungeți în același loc dintr-o *singură* mișcare (a se vedea Figura 9).



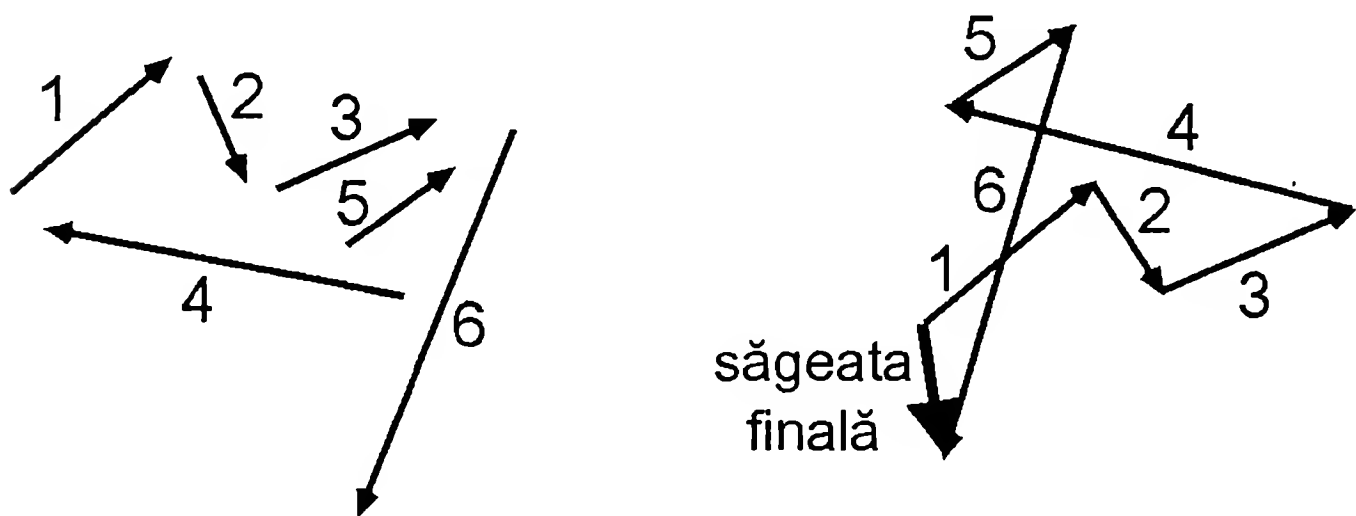
**Figura 6.** Caracteristica ciudată a reflexiei parțiale pe două suprafețe, i-a forțat pe fizicieni să renunțe la a face predicții absolute, în favoarea calculării numai a unei probabilități a evenimentului. Electrodinamica cuantică pune la dispoziție o metodă pentru a face aceasta – desenarea de mici săgeți pe o foaie de hârtie. Probabilitatea unui eveniment este reprezentată de aria pătratului având ca latură săgeata. De exemplu, o săgeată reprezentând o probabilitate de 0,04 (4%) are o lungime de 0,2.



**Figura 7.** Săgețile reprezentând probabilități de la 0% la 16%, au lungimi între 0 și 0,4.



**Figura 8.** Săgețile care reprezintă fiecare manieră posibilă în care se poate întâmpla un eveniment, se desenează și apoi se combină („se sumează”) în maniera care urmează: se atașează capătul unei săgeți de coada celeilalte – fără a se modifica direcția vreuneia din ele – și se desenează o „săgeată finală”, dinspre coada primei săgeți către vârful celei de-a doua.



**Figura 9.** Utilizând maniera descrisă în Figura 8, se pot aduna oricâte săgeți.

Acuma, care anume sunt regulile concrete ce determină lungimea și direcția fiecărei săgeți care, prin adunare, dau săgeata finală? În cazul de față, noi vom combina două săgeți: una reprezentând reflexia pe fața *superioară* a sticlei și una reprezentând reflexia pe fața *inferioară*.

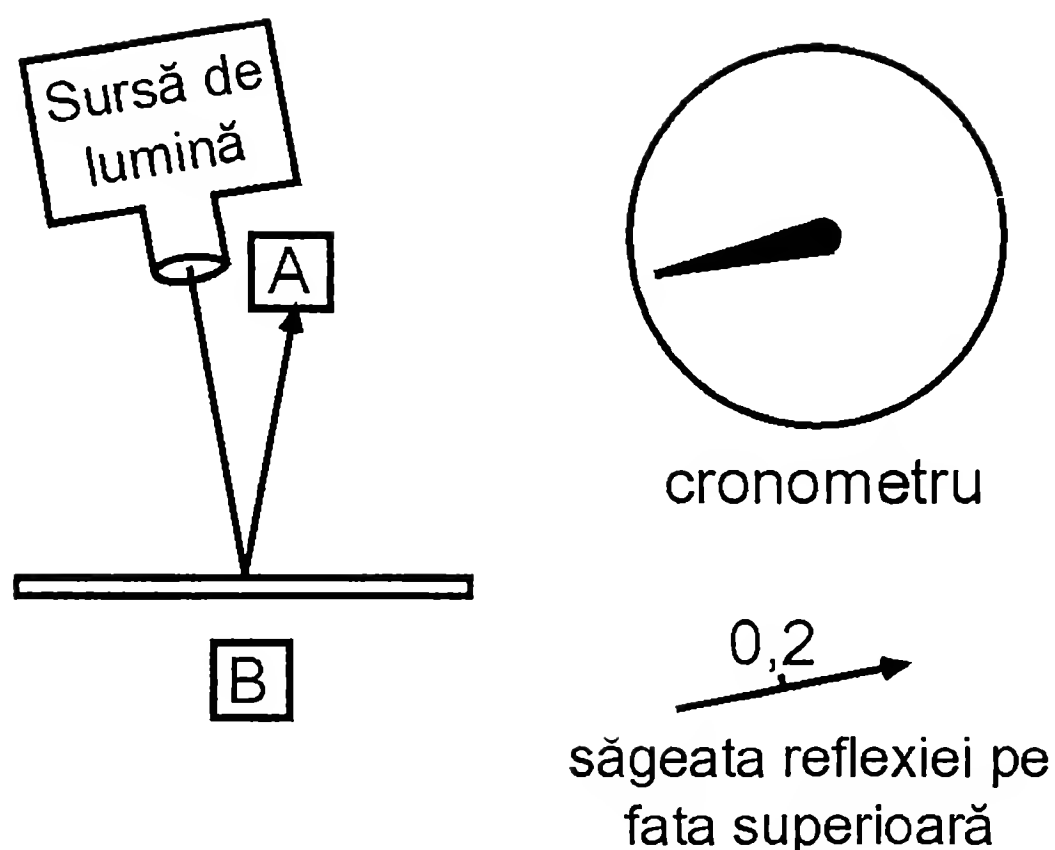
Mai întâi, să luăm în discuție lungimea. Așa cum am văzut în cadrul primului experiment (atunci când am plasat fotomultiplicatorul în interiorul sticlei), suprafața superioară reflectă 4% din fotonii ce cad pe ea. Aceasta înseamnă că săgeata „reflexiei superioare” are lungimea 0,2. Suprafața inferioară reflectă tot 4%, deci săgeata „reflexiei inferioare” are de asemenea lungimea 0,2.

Pentru a determina direcția fiecărei săgeți, haideți să ne imaginăm că avem un cronometru care poate măsura timpul cât se mișcă fotonul. Acest cronometru imaginar are un singur ac, care se rotește foarte, foarte rapid. Atunci când un foton părăsește sursa, pornim cronometrul. Atâta vreme cât fotonul se deplasează, acul cronometrului se învâртеște (pentru lumina roșie, de aproximativ 14.000 de ori pentru fiecare centimetru parcurs); atunci când fotonul ajunge la fotomultiplicator, oprim cronometrul. Acul acestuia sfârșește arătând într-o anumită direcție. Aceea este direcția pe care desenăm săgeata.

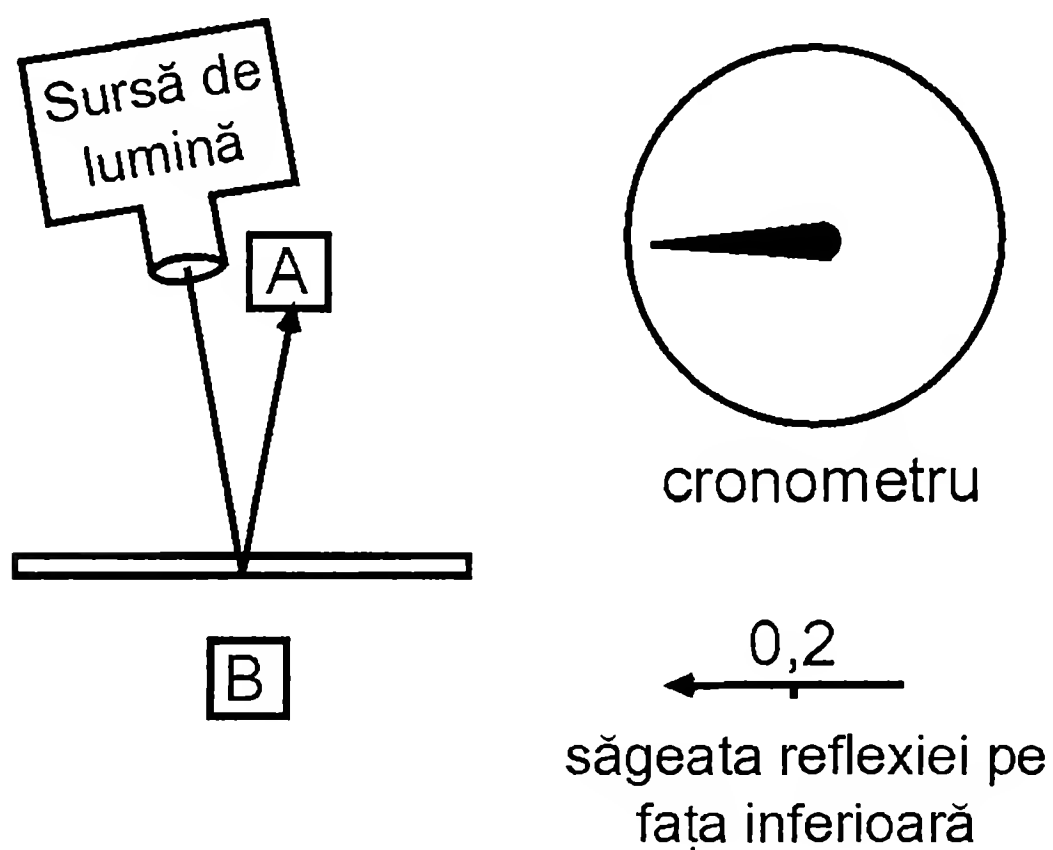
Ne mai trebuie o singură regulă pentru a calcula corect răspunsul: atunci când considerăm parcursul unui foton care ricoșează de fața *superioară* a sticlei, sensul săgeții se inversează. Cu alte cuvinte, în vreme ce săgeata reflexiei *inferioare* se desenează în *aceeași* direcție cu acul cronometrului, săgeata reflexiei *superioare* se desenează în direcție *opusă* acului cronometrului.

Haideți să desenăm acum săgețile pentru cazul luminii care se reflectă pe un strat de sticlă extrem de subțire. Pentru a desena săgeata reflexiei superioare, să ne imaginăm un foton care părăsește sursa de lumină (acul cronometrului începe să se învâртеască), ricoșează de fața superioară, și ajunge în punctul A (acul cronometrului se oprește). Desenăm o mică săgeată de lungime 0,2 în direcție opusă celei a acului cronometrului (a se vedea Figura 10).

Pentru a desena săgeata reflexiei inferioare, să ne imaginăm un foton care părăsește sursa de lumină (acul cronometrului începe să se învâртеască), trece prin fața superioară, ricoșează de fața inferioară, și ajunge în punctul A (acul cronometrului se oprește). De această dată, acul cronometrului este îndreptat aproape în aceeași direcție, deoarece unui foton care ricoșează de fața inferioară a sticlei îi ia doar un pic mai mult timp să ajungă în punctul A – el parcurge de două ori stratul de sticlă extrem de subțire. Desenăm acum o mică săgeată de lungime 0,2 în direcția arătată de acul cronometrului (a se vedea Figura 11).

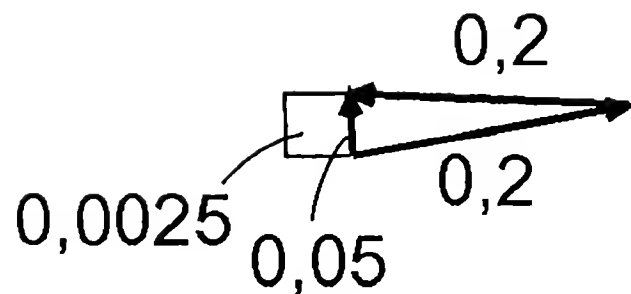


**Figura 10.** În cadrul unui experiment pentru măsurarea reflexiei parțiale pe o lamă de sticlă, putem afirma că un foton singular poate ajunge în punctul A în două feluri: de la suprafața superioară, sau de la suprafața inferioară. Se desenează câte o săgeată cu lungimea 0,2 pentru fiecare din cazuri, direcțiile acestora determinându-se prin intermediul acului unui „cronometru” ce măsoară timpul cât se deplasează fotonul. Săgeata „reflexiei superioare” se desenează în sens opus direcției în care s-a oprit acul.



**Figura 11.** Unui foton care ricoșează de suprafața inferioară a unui strat subțire de sticlă, îi ia un pic mai mult timp să ajungă în punctul A. Astfel, acul cronometrului se oprește pe o direcție ușor diferită de cea în care s-a oprit atunci când a măsurat timpul necesar fotonului reflectat de fața superioară. Săgeata „reflexiei inferioare” se desenează în aceeași direcție cu acul cronometrului.





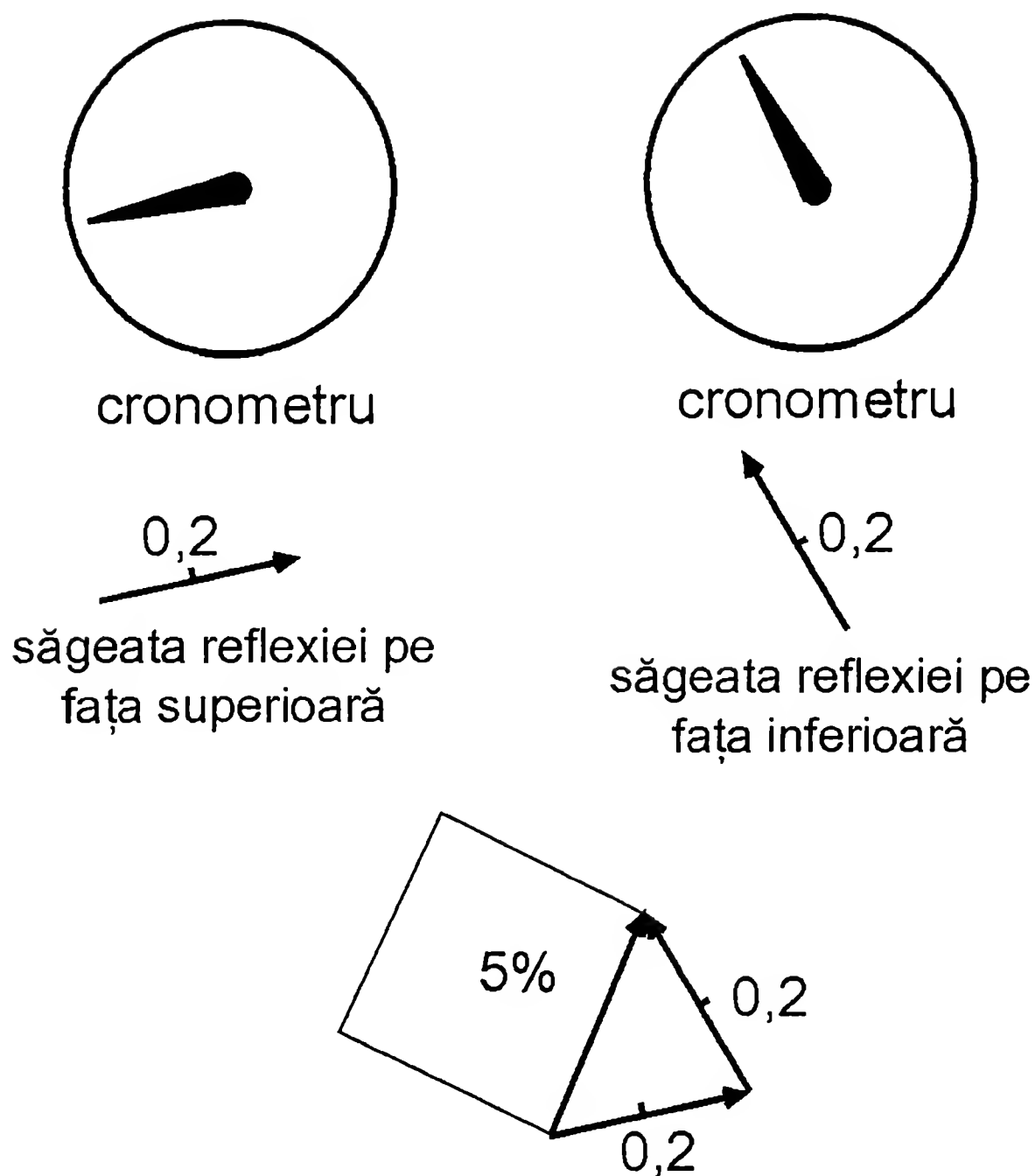
**Figura 12.** Săgeata finală, al cărei pătrat reprezintă probabilitatea de reflexie pe o lamă de sticlă extrem de subțire, se desenează ca suma dintre săgeata reflexiei superioare și săgeata reflexiei inferioare. Rezultatul este aproape zero.

Haideți acum să combinăm cele două săgeți. Din moment ce ele au aceeași lungime dar indică direcții aproape opuse, săgeata finală are o lungime aproape nulă, iar pătratul ei este încă și mai aproape de zero. Astfel, probabilitatea ca lumina să se reflecte pe un strat de sticlă infinitesimal este practic zero (a se vedea Figura 12).

Atunci când înlocuim cel mai subțire strat de sticlă cu unul un pic mai gros, fotonului care ricoșează de suprafața inferioară îi ia un pic mai mult timp să ajungă în punctul A; ca atare, acul cronometrului se mai rotește un pic înainte de a se opri, iar săgeata reflexiei inferioare sfârșește sub un unghi ceva mai mare în raport cu săgeata reflexiei superioare. Săgeata finală este un pic mai lungă și, corespunzător, pătratul ei este mai mare (a se vedea Figura 13).

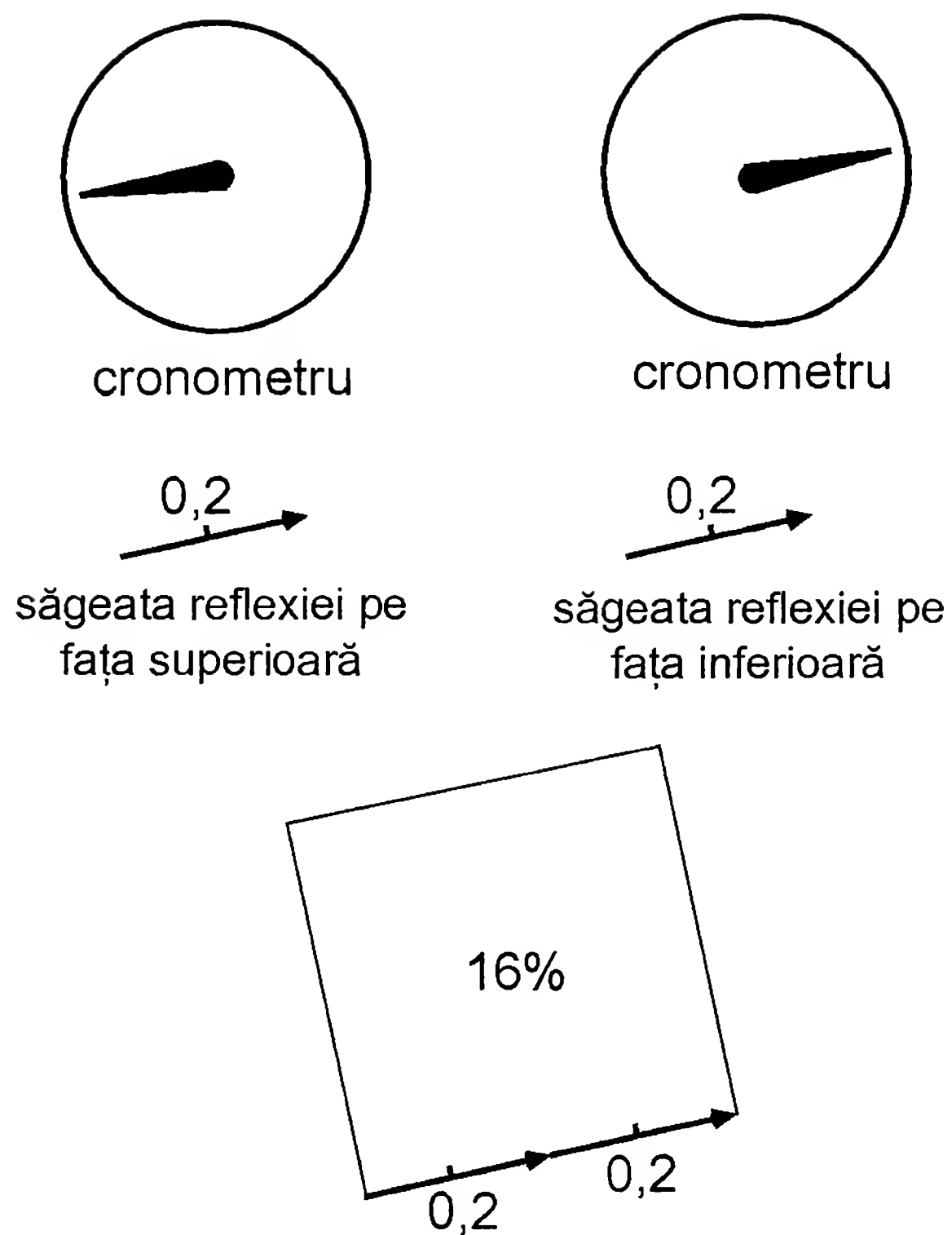
Ca un alt exemplu, haideți să urmărim cazul în care sticla este exact atât de groasă cât să avem o jumătate de rotație în plus a acului cronometrului, atunci când se măsoară durata mișcării unui foton ce ricoșează de suprafața inferioară. De această dată, săgeata reflexiei inferioare sfârșește arătând exact în aceeași direcție ca săgeata reflexiei superioare. Atunci când combinăm cele două săgeți, obținem o săgeată finală a cărei lungime este 0,4 și al cărei pătrat este 0,16, aceasta însemnând o probabilitate de 16% (a se vedea Figura 14).

Dacă mărim grosimea sticlei suficient de mult, astfel încât acul cronometrului ce măsoară durata drumului corespunzător suprafeței inferioare să facă exact o rotație *întreagă* în plus, cele două săgeți sfârșesc din nou prin a arăta în direcții opuse, iar săgeata finală este zero (a se vedea Figura 15). Această situație se petrece iar și iar, ori de câte ori grosimea sticlei este exact atât cât să permită încă o rotație completă a acului cronometrului ce măsoară timpul corespunzător reflexiei inferioare.

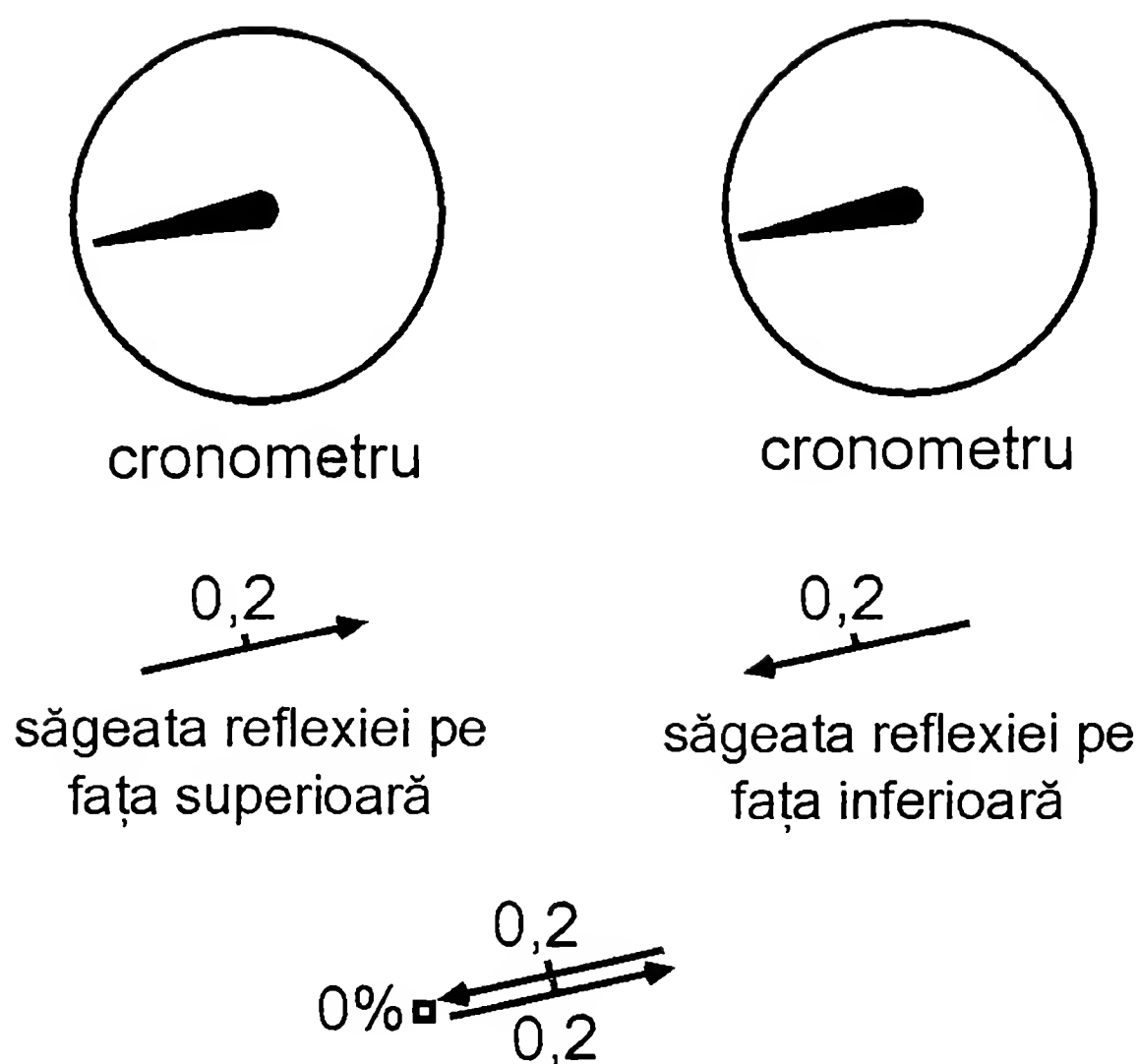


**Figura 13.** Săgeata finală pentru o lamă de sticlă un pic mai groasă este ceva mai lungă, din cauză că unghiul relativ dintre săgețile corespunzătoare reflexiilor superioară și inferioară este mai mare. Aceasta datorită faptului că, în comparație cu exemplul anterior, fotonului care ricoșează de fața inferioară îi ia un pic mai mult timp să ajungă în punctul A.

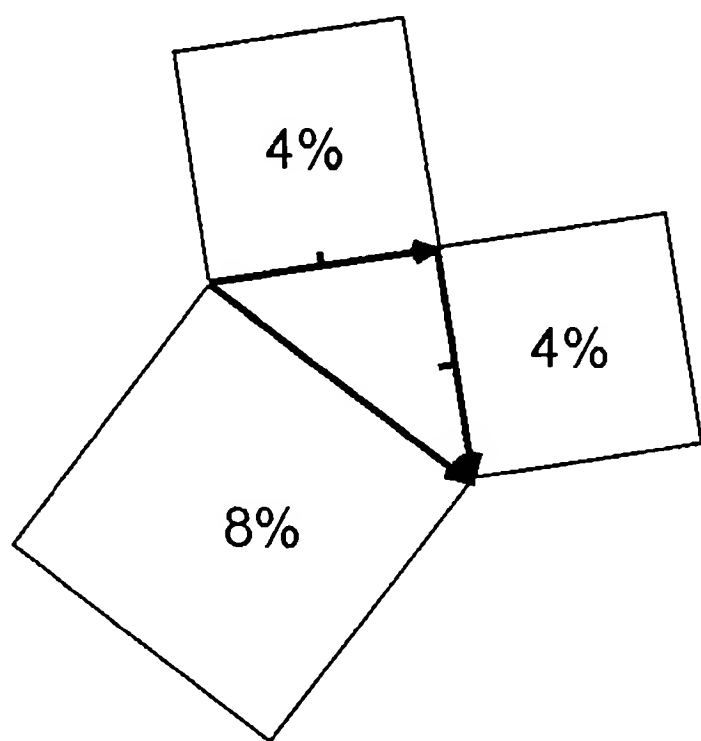




**Figura 14.** Atunci când stratul de sticlă este suficient de gros, exact cât să permită o jumătate de rotație în plus a acului cronometrului ce măsoară timpul pentru un foton reflectat de fața inferioară, săgețile reflexiilor superioară și inferioară sfârșesc prin a arăta în aceeași direcție. Rezultă o săgeată finală de lungime 0,4, ceea ce corespunde unei probabilități de 16%.



**Figura 15.** Atunci când lama de sticlă este exact de grosime potrivită pentru a permite una sau mai multe rotații întregi ale acului cronometrului care măsoară timpul pentru un foton reflectat de suprafața inferioară, săgeata finală este din nou egală cu zero și nu avem deloc reflexie.



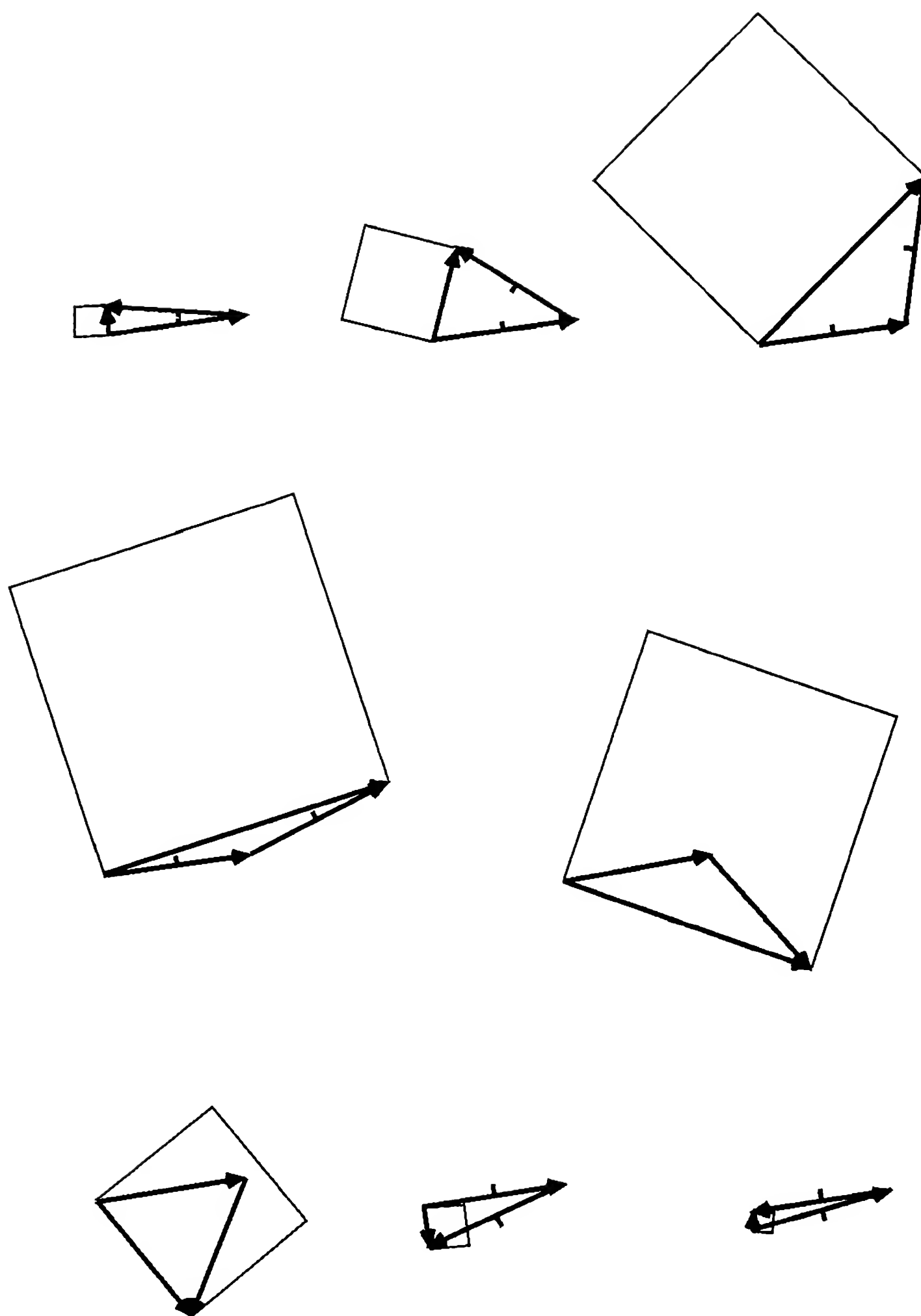
**Figura 16.** Atunci când săgețile reflexiilor superioară și inferioară fac între ele un unghi de 90°, săgeata finală reprezintă ipotenuza unui triunghi dreptunghic. Astfel, pătratul ei este egal cu suma celorlalte două pătrate – 8%.

Dacă grosimea sticlei este exact atât cât acul cronometrului ce măsoară timpul corespunzător reflexiei inferioare să efectueze în plus  $1/4$  sau  $3/4$  dintr-o rotație, cele două săgeți vor sfârși pe direcții perpendiculare. În acest caz, săgeata finală va constitui ipotenuza unui triunghi dreptunghic și, potrivit Teoremei lui Pitagora, pătratul ipotenuzei este egal cu suma pătratelor catetelor. Iată acea valoare care era corectă „de două ori pe zi”:  $4\% + 4\%$  face  $8\%$  (a se vedea Figura 16).

Să observăm că, pe măsură ce mărim treptat grosimea sticlei, săgeata reflexiei superioare arată mereu în aceeași direcție, pe când săgeata reflexiei inferioare își modifică tot timpul direcția. Modificarea orientării unei săgeți în raport cu cealaltă, face ca lungimea săgeții finale să se repete ciclic, între valorile zero și  $0,4$ ; ca urmare, *pătratul* săgeții finale se repetă ciclic între zero și  $16\%$ , așa cum s-a observat în experimentul nostru (a se vedea Figura 17).

Tocmai v-am demonstrat cum se poate calcula cu exactitate această stranie trăsătură a reflexiei parțiale, desenând niște afurisite de săgetuțe pe o foaie de hârtie. Termenul tehnic pentru aceste săgeți este „amplitudinea probabilităților”, și mă simt mai important atunci când spun „noi calculăm amplitudinea probabilității unui eveniment”. Totuși, prefer să recunosc cinstit că ceea ce încercăm noi să găsim este săgeata al cărei pătrat reprezintă probabilitatea de a se întâmpla ceva.

Mai înainte de a încheia această prelegere, aș dori să vă vorbesc despre culorile pe care le observați pe baloanele de săpun. Sau, și mai cunoscut, atunci când automobilul dumneavoastră pierde ulei, dacă vă uitați la uleiul maroniu de la suprafața unei băltoace, observați niște culori superbe. Pelicula fină de ulei care plutește deasupra băltoacei acționează precum o lamă foarte subțire de sticlă – ea reflectă lumina de o culoare dată de la zero până la valoarea maximă, în funcție de grosime. Dacă asupra unei pelicule de ulei proiectăm o lumină roșie pură, observăm niște regiuni luminate în roșu, separate prin benzi înguste întunecate (acolo unde nu se produce reflexie, din cauză că grosimea peliculei de ulei nu este aceeași peste tot). Dacă asupra peliculei proiectăm o lumină pură albastră, observăm niște regiuni luminate în albastru, separate prin benzi înguste întunecate. Dacă proiectăm ambele lumini, observăm zone care au exact grosimea potrivită pentru a reflecta puternic doar lumina roșie, și alte zone care au exact grosimea potrivită pentru a reflecta doar lumina albastră; alte zone, încă, au o grosime care reflectă puternic atât lumina roșie cât și lumina albastră (pe acestea dumneavoastră le



**Figura 17.** Pe măsură ce lamele subțiri de sticlă sunt înlocuite cu lame mai groase, acul cronometrului ce măsoară timpul corespunzător unui foton reflectat de suprafața inferioară, se rotește un pic mai mult, iar unghiul relativ dintre săgețile reflexiilor superioară și inferioară se schimbă. Aceasta face ca săgeata finală să-și modifice lungimea și ca valoarea pătratului ei să varieze de la zero la 16% și înapoi la zero, iar și iar.

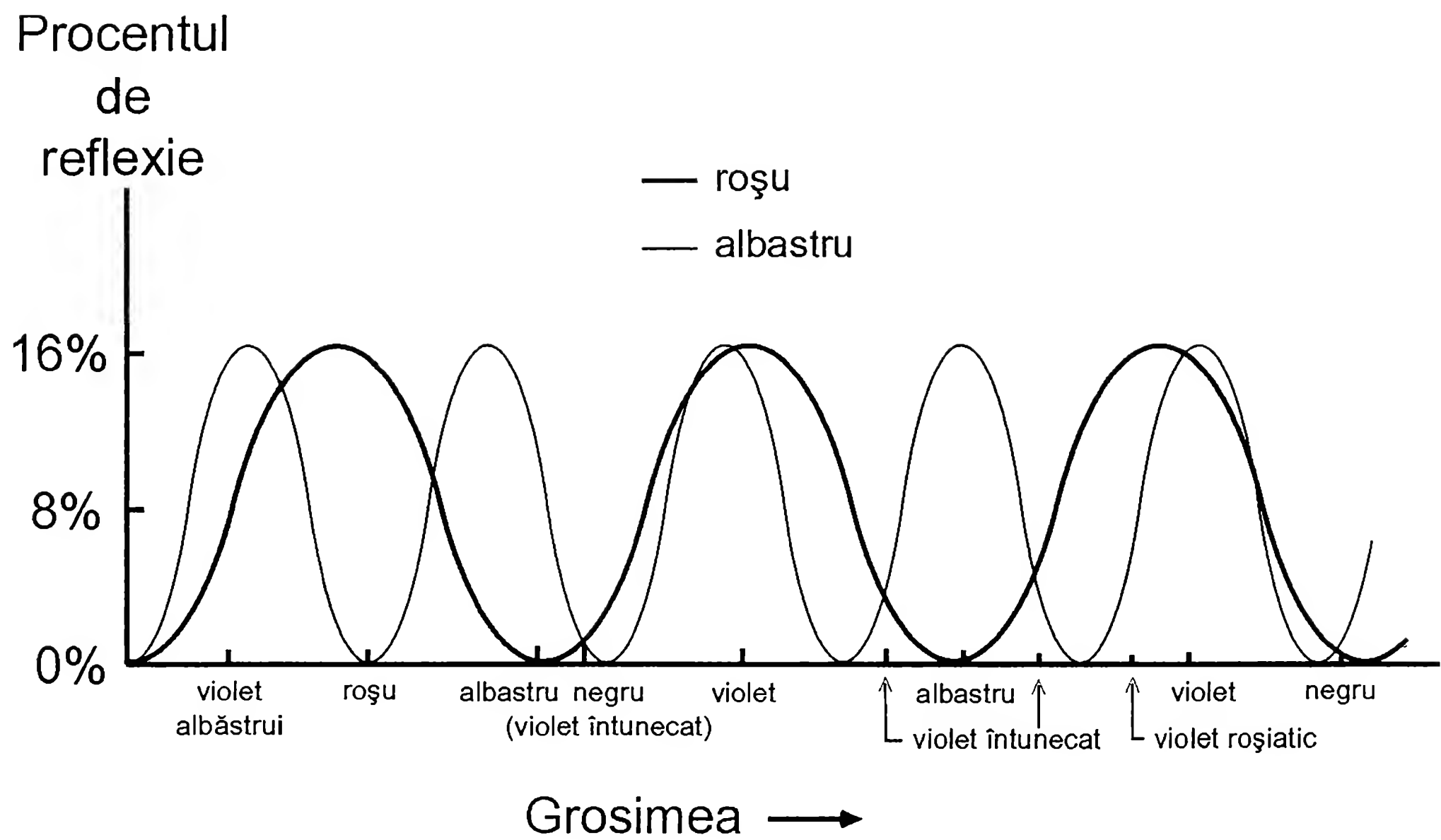
vedeți ca fiind violet), în vreme ce altele, în fine, au exact grosimea necesară pentru a anula orice reflexie, și apar ca negre.

Pentru a înțelege mai bine acest fenomen, trebuie să știm faptul că ciclul de la zero la 16% al reflexiei parțiale pe două suprafețe, se repetă ceva mai rapid pentru lumina albastră decât pentru cea roșie. Ca urmare, pentru anumite grosimi, una, sau cealaltă, sau amândouă dintre culori sunt puternic reflectate, pe când pentru alte grosimi, reflexia ambelor culori se anulează (a se vedea Figura 18). Ciclurile reflexiei se repetă în ritmuri diferite, din cauză că acul cronometrului se rotește mai repede atunci când măsoară timpul corespunzător unui foton albastru decât o face în situația unui foton roșu. În fapt, aceasta este *singura* diferență dintre un foton roșu și unul albastru (sau unul de orice altă culoare, inclusiv unde radio, raze X, etc.) – viteza de rotație a acului cronometrului.

Atunci când proiectăm lumină roșie și albastră asupra unei pelicule de ulei, apar diverse forme de culoare roșie sau albastră sau violet, separate între ele prin dungi negre. Atunci când asupra uleiului de la suprafața unei băltoace cade lumina Soarelui, care conține lumină roșie, galbenă, verde și albastră, zonele care reflectă puternic fiecare din aceste culori se suprapun, producând tot felul de combinații pe care ochii noștri le percep drept culori diferite. Pe măsură ce pata de ulei se întinde și se mișcă pe suprafața apei, modificându-și grosimea în diverse locuri, tiparele colorate se schimbă continuu. (Pe de altă parte, dacă ați privi aceeași băltoacă noaptea, la lumina uneia din lămpile acelea de pe stradă cu vapori de sodiu, ați observa doar dungi gălbui separate de negru – este din cauză că acele becuri emit lumină doar de o singură culoare.

Acest fenomen, al culorilor produse prin reflexia parțială a luminii albe pe două suprafețe, se numește irizație, și poate fi întâlnit în multe situații. Poate că v-ați întrebat cum iau naștere culorile vii ale păunilor și păsărilor colibri. Acum știți. Modul în care au evoluat aceste culori vii este de asemenea o chestiune interesantă. Atunci când admirăm un păun, trebuie să admitem că meritul este al generațiilor întregi de păunițe cu culori șterse, care au fost pretențioase în alegerea masculilor. (Omul a intervenit abia mai târziu și a canalizat procesul de selecție la păuni.)

În prelegerea următoare vă voi arăta modul în care, pe baza acestui proces absurd de combinare de mici săgeți, se pot calcula răspunsurile exacte pentru acele alte fenomene care vă sunt familiare:



**Figura 18.** Pe măsură ce grosimea stratului crește, cele două suprafețe produc o reflexie parțială a luminii monocromatice, a cărei probabilitate fluctuează ciclic de la zero la 16%. Cum viteza de rotație a acului cronometrului imaginar este diferită pentru diferite culori ale luminii, ciclul se repetă în ritmuri diferite. Ca urmare, atunci când asupra stratului sunt proiectate două culori, cum ar fi roșul pur și albastrul pur, o grosime dată va reflecta numai lumina roșie, sau numai pe cea albastră, sau pe amândouă în proporții diferite (ceea ce va produce diferite nuanțe de violet), sau pe niciuna (negru). Dacă stratul are grosime variabilă, așa ca în cazul unei picături de ulei întinse pe suprafața unei băltoace, vor fi vizibile toate variantele. În lumină naturală, care constă din toate culorile, se vor produce tot felul de combinații, acestea dând naștere unei multitudini de nuanțe.

*QED*

faptul că lumina se propagă în linie dreaptă, faptul că ea se reflectă pe suprafața unei oglinzi sub același unghi sub care cade („unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie“), faptul că o lentilă focalizează lumina, și așa mai departe. Acest nou cadru conceptual va descrie tot ceea ce cunoașteți în legătură cu lumina.

# 2

## FOTONII: PARTICULE DE LUMINĂ

Aceasta este a doua prelegere dintr-o serie dedicată electrodinamicii cuantice. Întrucât este evident că niciunul dintre dumneavoastră nu a fost prezent la prima prelegere (le-am spus respectivilor că nu vor înțelege nimic), voi rezuma în câteva cuvinte despre ce a fost vorba în ea.

Am vorbit despre lumină. Prima trăsătură importantă în legătură cu lumina este aceea că, atunci când lumina monocromatică (de o singură culoare) foarte slabă lovește un detector, se dovedește că ea este alcătuită din particule. Detectorul produce clicuri de tărie egală, din ce în ce mai rare, pe măsură ce lumina devine din ce în ce mai slabă.

Cealaltă trăsătură importantă a luminii, pe care am discutat-o în prima prelegere, este reflexia parțială a luminii monocromatice. Din fotonii care lovesc o suprafață *singulară* de sticlă, se reflectă în medie 4%. Aceasta constituie din start un mister profund, căci este imposibil de prezis care fotoni vor ricoșa și care vor trece dincolo. Cu o *a doua* suprafață, rezultatele devin încă și mai stranii: în locul așteptatului procent de reflexie de 8%, reflexia parțială poate fi amplificată până la nu mai puțin de 16%, sau poate fi stopată, în funcție de grosimea sticlei.

Pentru lumina intensă, acest ciudat fenomen care este reflexia parțială pe două suprafețe, poate fi explicat printr-o teorie ondulatorie. Dar teoria undelor nu poate explica modul în care detectorul produce clicuri de tărie egală atunci când lumina devine din ce în ce mai slabă. Electrodinamica cuantică „rezolvă” această dualitate undă-corpusul, afirmând că lumina este compusă din particule (așa cum a crezut Newton la început). Însă prețul acestui mare pas înainte al științei, este retragerea fizicii pe pozițiile pe care ea este în măsură să calculeze doar *probabilitatea* ca un foton să lovească detectorul, fără a oferi un model ca lumea pentru maniera efectivă în care se întâmplă aceasta.



În prima prelegere am descris modul în care fizicienii calculează probabilitatea ca un anumit eveniment să se petreacă. Ei desenează niște săgeți pe hârtie, potrivit regulilor care urmează.

**PRINCIPIU FUNDAMENTAL:** Probabilitatea unui eveniment este egală cu pătratul lungimii unei săgeți, numite „amplitudinea probabilității”. De exemplu, o săgeată cu lungimea egală cu 0,4, reprezintă o probabilitate de 0,16, sau 16%.

**REGULĂ GENERALĂ** de desenare a săgeților, în cazul în care un eveniment se poate petrece în moduri alternative: Se desenează câte o săgeată pentru fiecare mod în parte, după care cele două săgeți se compun (se „adună”) plasând vârful uneia din ele în coada celeilalte. Apoi se desenează „săgeata finală”, unind coada primei săgeți cu vârful ultimei. Pătratul săgeții finale dă probabilitatea întregului eveniment.

Am mai menționat, de asemenea, anumite reguli concrete de desenare a săgeților în cazul reflexiei parțiale pe sticlă (le puteți găsi la pagina 36).

Toate cele de mai sus constituie un rezumat al primei prelegeri.

Ceea ce aș dori acum, este să vă prezint maniera în care acest model al lumii, atât de diferit de orice ați văzut până în clipa de față (încât sperați, poate, să nu-l mai vedeți niciodată), este capabil să explice toate proprietățile simple pe care le cunoaștem în legătură cu lumina. Mă refer aici la faptul că, atunci când lumina se reflectă pe o oglindă, unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie; că razele de lumină se frâng la trecerea ei din aer în apă; că lumina se propagă în linie dreaptă; că lentilele focalizează lumina, și așa mai departe. Teoria descrie, de asemenea, multe alte proprietăți ale luminii, care probabil că nu vă sunt familiare. În fapt, cea mai mare dificultate pe care am întâmpinat-o la redactarea acestor prelegeri, a fost cea de a rezista tentației de a deduce toate acele lucruri referitoare la lumină, pe care v-ați muncit atâta timp să le învățați pe vremea școlii. Este vorba, de pildă, de modul în care lumina trece dincolo de muchia unui obstacol, formând umbra (fenomenul se numește difracție). Însă, cum cei mai mulți dintre dumneavoastră nu au urmărit cu îndeamănuntul astfel de fenomene, nu mă voi sinchisi prea mult de ele. Totuși, vă pot garanta că *toate* fenomenele referitoare la lumină care au fost observate

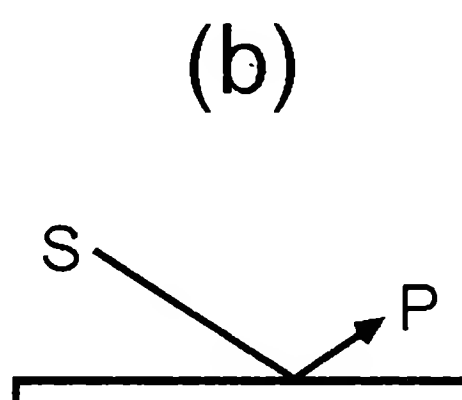
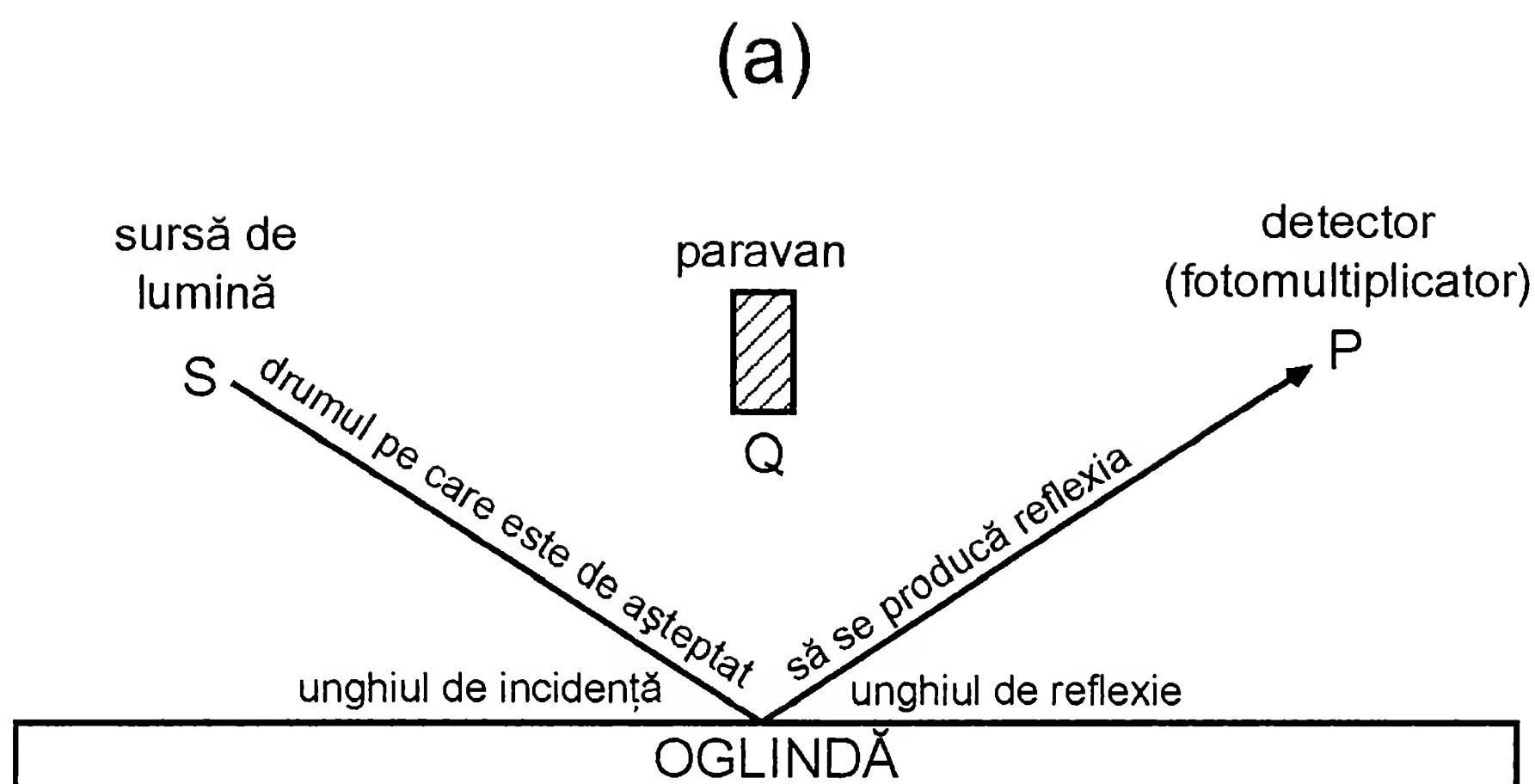
în detaliu, pot fi explicate de teoria electrodinamicii cuantice. (Altfel, exemplele pe care vi le voi da, și care descriu doar fenomenele cele mai simple și mai obișnuite, ar putea să vă lase o impresie greșită.)

Să începem cu problema determinării modului în care lumina se reflectă pe o oglindă (a se vedea Figura 19). În punctul S dispunem de o sursă ce emite lumină de o singură culoare și cu intensitate foarte slabă (haideți să folosim din nou lumină roșie). Sursa emite câte un foton o dată. În punctul P așezăm un fotomultiplicator, pentru a detecta fotonii. Haideți să-l punem la aceeași înălțime cu sursa – atunci când totul este simetric, este mai ușor de desenat săgețile. Dorim să calculăm șansa ca detectorul să producă un clic după ce sursa va fi emis un foton. Din moment ce este posibil ca fotonul să o ia drept spre detector, haideți să plasăm un paravan Q, care să împiedice acest lucru.

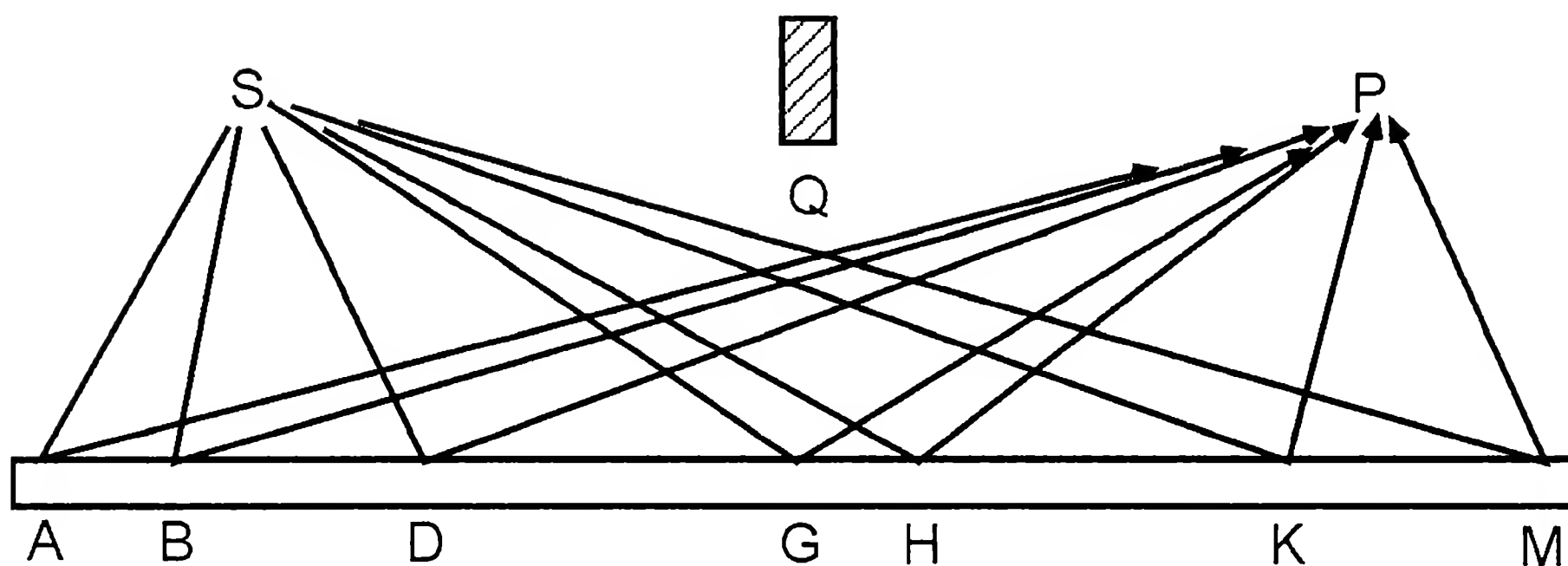
Acuma, ne-am aștepta ca toată lumina care ajunge la detector, să se reflecte în partea de mijloc a oglinzii, pentru că acela este locul în care unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie. Și ne-ar părea cât se poate de evident ca părțile oglinzii dinspre cele două capete să aibă de-a face tot atât de mult cu reflexia, ca baba cu mitraliera, este?

Deși ați putea *crede* că părțile dinspre capete ale oglinzii nu au nicio legătură cu reflexia luminii care se propagă de la sursă la detector, haideți să vedem ce are de spus teoria cuantică în această privință. Regulă: probabilitatea petrecerii unui eveniment anume este egală cu pătratul săgeții finale obținute prin desenarea câte unei săgetuțe pentru fiecare din modurile în care evenimentul s-ar putea întâmpla, și prin compunerea („adunarea”) acestora. În experimentul în care se măsoară reflexia parțială a luminii pe două suprafețe, existau două moduri în care un foton putea ajunge de la sursă la detector. În acest experiment, există milioane de feluri în care s-ar putea deplasa fotonul: ar putea ajunge în partea stângă a oglinzii, în punctele A sau B (de pildă), și de acolo la detector (a se vedea Figura 20); sau ar putea ricoșa în punctul G, acolo unde vă așteptați dumneavoastră; ori ar putea coborî în partea dreaptă a oglinzii, în punctele K sau M, și de acolo să urce spre detector. Ați putea crede că sunt nebun, deoarece la majoritatea modurilor în care v-am spus că s-ar putea reflecta fotonul pe oglindă, unghiurile nu sunt egale. Dar *nu* sunt nebun, căci lumina chiar se propagă astfel! Cum să fie posibil așa ceva?

Pentru a face această problemă mai ușor de înțeles, haideți să presupunem că oglinda constă doar dintr-o fâșie lungă, de la stânga la dreapta – putem foarte bine, pentru moment, să uităm că oglinda iese



**Figura 19.** Viziunea clasică asupra lumii afirmă că o oglindă va reflecta lumina în punctul în care unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie, inclusiv în cazul în care sursa și detectorul se găsesc la înălțimi diferite, așa cum se întâmplă în varianta (b).



**Figura 20.** Viziunea cuantică asupra lumii afirmă că lumina are amplitudine egală de reflexie în orice punct al oglinzii, de la A până la M.

din planul foii de hârtie (a se vedea Figura 21). Chiar dacă pe această fâșie de oglindă există în realitate milioane de locuri în care lumina s-ar putea reflecta, haideți să facem o aproximare și, pentru moment, să împărțim oglinda într-un număr bine precizat de mici pătrate, considerând numai câte un singur drum pentru fiecare din ele – calculele noastre sunt cu atât mai precise cu cât luăm pătrate din ce în ce mai mici, și cu cât numărul de drumuri crește în mod corespunzător.

Acum, haideți să desenăm câte o săgețuță pentru fiecare mod în care lumina s-ar putea propaga în situația dată. Fiecare mică săgeată are o anumită lungime și o anumită direcție. Să luăm mai întâi în discuție lungimea. Ați putea crede că săgeata pe care o desenăm pentru a reprezenta drumul către mijlocul oglinzii, în G, este de departe



**Figura 21.** Pentru a calcula mai ușor drumul pe care merge lumina, ar trebui pentru moment să considerăm doar o fâșie de oglindă, împărțită în mici pătrate, fiecărui pătrat corespunzându-i doar un drum. Această simplificare nu afectează în niciun fel analizarea cu precizie a situației.

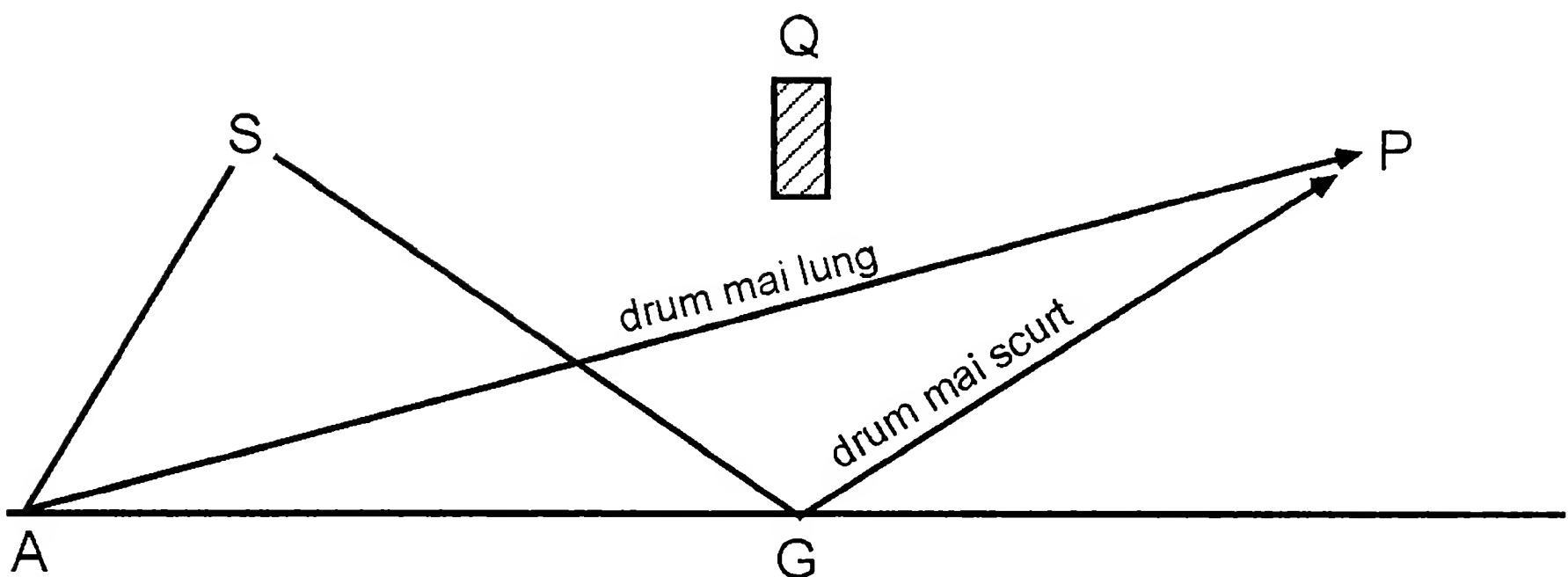
cea mai lungă (de vreme ce probabilitatea pare a fi foarte mare ca toți fotonii ajunși la detector să o fi luat pe acest drum), și că săgețile corespunzătoare drumurilor pe la capetele oglinzii sunt foarte scurte. Nu, nu, n-ar trebui să instituim o asemenea regulă arbitrară. Regula corectă – ceea ce se petrece efectiv – este mult mai simplă: un foton ce ajunge la detector are șanse aproape egale să o ia pe *oricare* din drumuri, deci toate săgețile au aproape aceeași lungime. (În realitate, există anumite variații foarte mici ale lungimilor, datorate diverselor unghiuri și distanțe implicate, dar ele sunt atât de neînsemnate, încât le voi ignora.) Așadar, haideți să spunem că fiecare săgetuță pe care o vom desena are o lungime standard oarecare – voi lua lungimea foarte mică, pentru că sunt multe astfel de săgeți, corespunzând multelor moduri în care se poate propaga lumina (a se vedea Figura 22).

Dacă despre lungimea tuturor săgeților se poate presupune fără grijă că este aproape la fel, nu același lucru este valabil pentru direcțiile lor. Este evident că acestea vor fi diferite, din cauza diferențelor de timp – așa cum vă aduceți aminte din prima prelegere, direcția unei săgeți anume este determinată de poziția finală a acului unui cronometru imaginar, care măsoară timpul necesar unui foton pentru a parcurge drumul dat. Atunci când un foton se duce mult spre capătul din stânga al oglinzii, în punctul A, și apoi ajunge la detector, este clar că aceasta îi ia un timp mai lung decât îi ia altuia, care ajunge la detector reflectându-se pe mijlocul oglinzii, în punctul G (a se vedea Figura 23). Sau, altfel spus, imaginați-vă pentru o clipă că ați fi în mare grabă, alergând de la sursă la oglindă, iar apoi la detector. V-ar fi limpede că în mod sigur nu este o idee bună să vă duceți tocmai până în punctul A, și apoi să vă întoarceți la detector; ar fi mult mai rapid să atingeți oglinda undeva la mijloc.

Pentru a calcula mai ușor direcția fiecărei săgeți, voi desena un grafic exact dedesubtul schiței cu oglinda (a se vedea Figura 24). În dreptul fiecărui loc de pe oglindă în care s-ar putea reflecta lumina, voi reprezenta pe o axă verticală timpul necesar acesteia pentru parcurgerea drumului respectiv. Cu cât timpul va fi mai lung, cu atât voi lua un punct mai sus pe axă. Începând cu partea stângă a oglinzii, timpul necesar unui foton pentru parcurgerea drumului care suferă



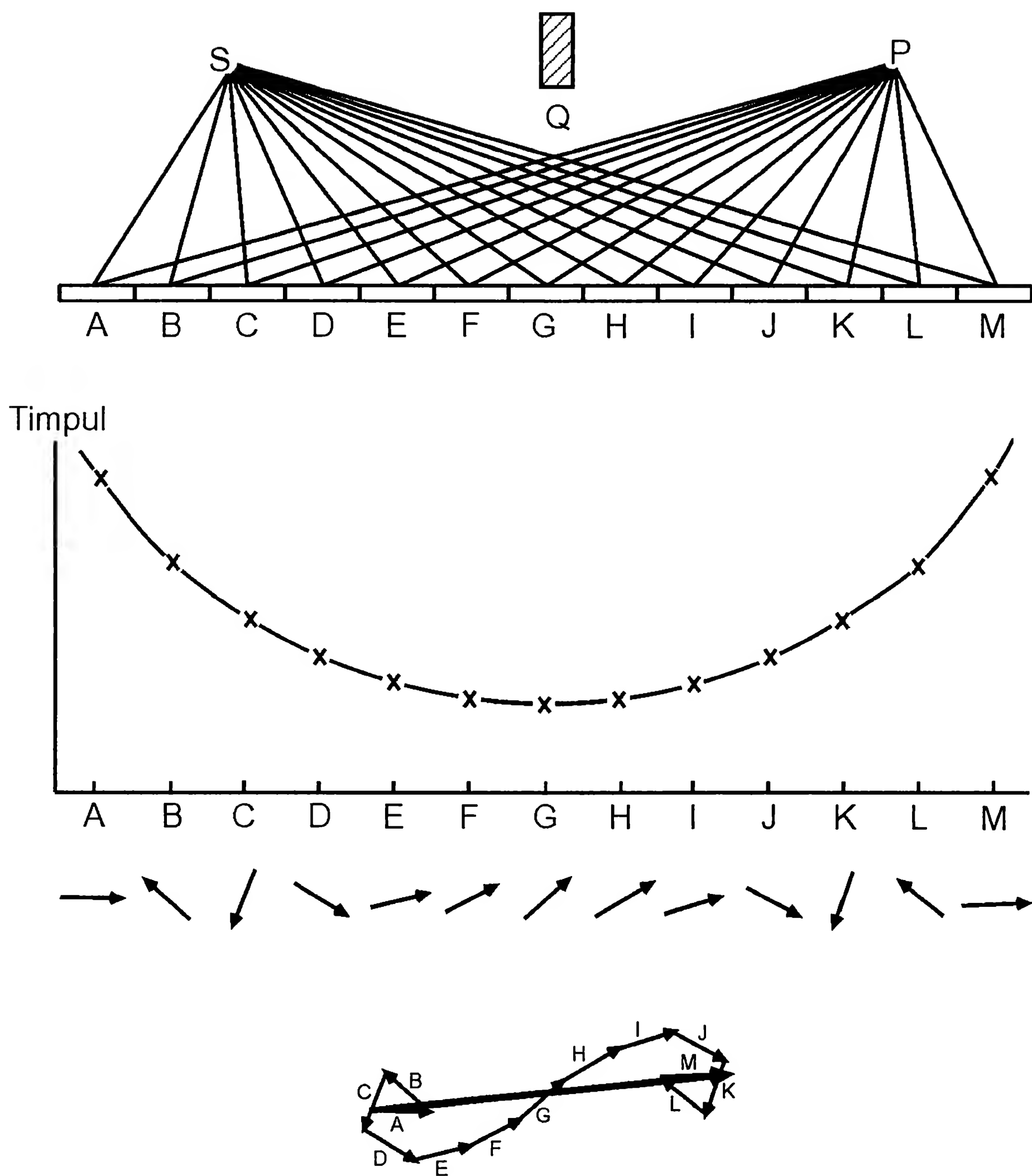
**Figura 22.** Fiecare mod în care se poate propaga lumina, va fi reprezentat în calculele noastre printr-o săgeată de lungime standard arbitrară, așa ca aceasta.



**Figura 23.** Dacă lungimea fiecărei săgeți este în esență aceeași, direcțiile lor diferă, din cauza timpului necesar unui foton pentru parcurgerea diferitelor drumuri. În mod evident, durează mai mult să mergi de la S la A și apoi la P, decât să mergi de la S la G și apoi la P.

reflexie în punctul A este destul de lung, deci voi trasa un punct destul de sus pe axă. Pe măsură ce ne mutăm către mijlocul oglinzii, timpul necesar fotonului pentru parcurgerea drumurilor respective scade, deci trasăm puncte succesive din ce în ce mai jos pe axă. După ce trecem de centrul oglinzii, timpul necesar fotonului crește din nou, și deci trasăm iarăși puncte tot mai ridicate. Pentru a urmări mai ușor graficul, haideți să unim punctele: ele formează o curbă simetrică, ce începe de undeva mai de sus, coboară, iar apoi urcă la loc.

Acuma, ce presupune aceasta pentru direcțiile săgetuțelor? Direcția unei săgeți anume corespunde intervalului de timp necesar unui foton să ajungă de la sursă la detector pe drumul respectiv. Haideți să desenăm săgețile începând din partea stângă. Drumul A necesită timpul cel mai lung; săgeata lui este orientată într-o direcție oarecare (a se vedea Figura 24). Săgeata pentru drumul B este îndreptată într-o altă direcție, pentru că intervalul de timp este diferit. La mijlocul oglinzii, săgețile F, G și H sunt orientate aproape la fel, deoarece timpii corespunzători sunt aproape egali. După ce trecem de mijlocul oglinzii, observăm că fiecare drum din partea dreaptă a acesteia corespunde unuia din stânga, timpii respectivi fiind perfect egali (aceasta este o consecință a faptului că am plasat sursa și detectorul la aceeași înălțime, și că am ales punctul G exact la mijloc). Ca atare, săgeata corespunzătoare drumului J, de pildă, are aceeași orientare ca cea pentru drumul D.



**Figura 24.** În partea de sus a figurii sunt reprezentate toate drumurile pe care ar putea-o lua lumina (în situația simplificată). Dedesubtul lor sunt punctați, pe un grafic, timpii corespunzători necesari unui foton pentru a se deplasa de la sursă la oglindă, și de acolo la detector. Sub axa orizontală a graficului, sunt desenate direcțiile fiecărei săgeți, iar în partea de jos a figurii vedem rezultatul adunării tuturor săgeților. Se observă că aportul major la lungimea săgeții finale este cel al săgetuțelor  $E, F, G, H$  și  $I$ , ale căror direcții sunt aproape la fel, din cauză că timpii corespunzători acestor drumuri sunt aproape egali. În plus, aceasta se întâmplă a avea loc în jurul valorii minime a timpului total. Ca atare, este aproximativ corect atunci când se afirmă că lumina se propagă pe drumul pentru care timpul este minim.



Haideți acum să adunăm săgetuțele (a se vedea Figura 24). Începând cu săgeata A, atașăm săgețile una de alta, punându-le cap la cap. Acuma, dacă ar fi să ne plimbăm de-a lungul săgeților, făcând câte un pas pentru fiecare săgetuță, la început nu am ajunge prea departe, căci direcțiile pașilor consecutivi sunt foarte diferite. Dar, după o vreme, săgețile încep să fie îndreptate aproximativ în aceeași direcție, și reușim să înaintăm întrucâtva. Apoi, către finalul plimbării noastre, direcția se modifică iarăși în mod semnificativ de la un pas la altul, și din nou ne împleticim pe loc.

Tot ce avem de făcut acum este să desenăm săgeata finală. Pur și simplu, unim coada primei săgetuțe cu vârful ultimei, și urmărim cât de mult am înaintat efectiv în plimbarea noastră (a se vedea Figura 24). Și băgați de seamă: obținem o săgeată considerabilă! Teoria electrodinamicii cuantice prevede că, într-adevăr, lumina se reflectă pe oglindă!

Haideți acum să analizăm lucrurile. Ce anume determină cât este de lungă săgeata finală? Constatăm o serie de lucruri. În primul rând, capetele oglinzii nu contează: în dreptul lor, săgetuțele se îndreaptă alandala, fără să ducă nicăieri. Dacă aș reteza capetele oglinzii – părțile cu studierea cărora dumneavoastră știți în mod instinctiv că îmi pierd vremea – abia dacă s-ar sesiza vreo diferență în lungimea săgeții finale.

Unde se găsește deci partea oglinzii care face ca lungimea săgeții finale să fie considerabilă? Ea este acolo unde săgetuțele arată toate aproape în aceeași direcție – din cauză că *timpii* corespunzători sunt aproape *egali*. Dacă vă uitați pe graficul timpilor în funcție de drum (a se vedea Figura 24), observați că aceștia variază cel mai puțin de la un drum la altul în partea inferioară a curbei, acolo unde *timpul este minim*. Ca să rezumăm, acolo unde drumurile învecinate sunt aproape egale, acolo timpul este minim; și tot acolo săgetuțele sunt îndreptate aproape în aceeași direcție, dând prin adunare o săgeată finală cu lungime considerabilă; acela este locul unde se stabilește probabilitatea reflectării unui foton pe oglindă. Și acesta este motivul pentru care, în primă aproximație, nu este nicio nenorocire dacă adoptăm viziunea grosolană asupra lumii, potrivit căreia lumina se propagă numai pe drumul pentru care *timpul este minim*. (Și se poate arăta ușor că acolo unde timpul este minim, unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie, dar n-am să-mi pierd vremea cu asta).

Deci, teoria electrodinamicii cuantice ne oferă răspunsul corect – la reflexie, partea importantă a unei oglinzi este mijlocul ei – dar acest rezultat corect se obține cu prețul credinței că lumina se reflectă pe toată oglinda, și că trebuie să adunăm o groază de săgetuțe al căror

unic scop este să se anuleze unele pe altele. Toate acestea v-ar putea părea doar o pierdere de vreme – doar o joacă infantilă de matematicieni. În definitiv, să ai doar ceva ce se anulează, nu prea sună a „fizică adevărată“.

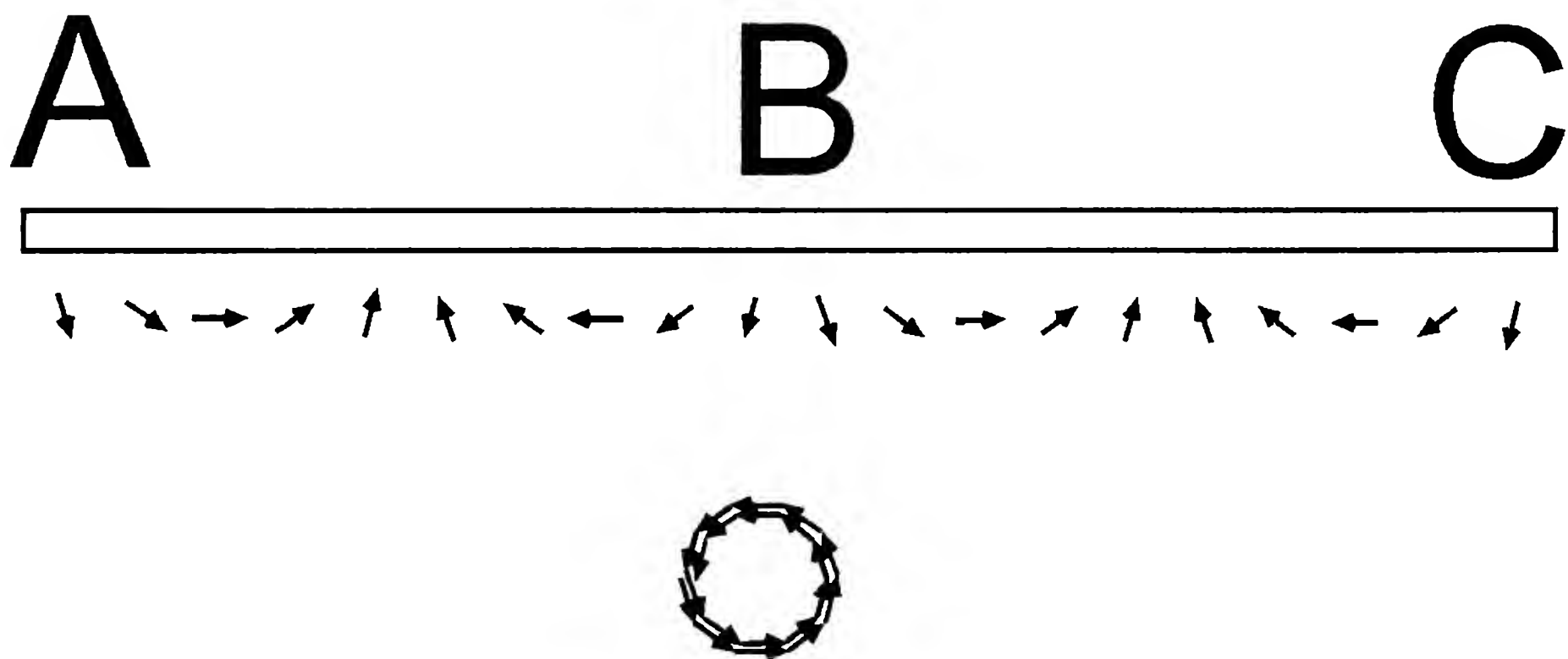
Haideți acum să verificăm, printr-un alt experiment, faptul că, într-adevăr, *chiar există* reflexie de-a lungul întregii oglinzi. Mai întâi, haideți să decupăm o mare parte din oglindă, și să lăsăm doar aproximativ un sfert din ea, în capătul din stânga. Încă dispunem de o bucată consistentă de oglindă, dar care nu este amplasată acolo unde trebuie. În experimentul anterior, săgețile din partea stângă a oglinzii erau îndreptate în direcții mult diferite unele față de altele, din cauza diferențelor mari între intervalele de timp corespunzând drumurilor învecinate (a se vedea Figura 24). În cadrul acestui experiment, voi efectua un calcul mai detaliat, împărțind partea din stânga a oglinzii în porțiuni mult mai înguste – suficient de fine încât să nu existe mari diferențe de timp pentru drumurile învecinate (a se vedea Figura 25). Din această perspectivă mai detaliată, observăm că unele dintre săgetuțe sunt orientate mai mult sau mai puțin spre dreapta, iar altele sunt orientate mai mult sau mai puțin spre stânga. Dacă le adunăm pe *toate*, obținem un mănunchi de săgeți care în esență se învârtesc în cerc, neducând nicăieri.

Dar haideți să presupunem că scrijelim cu grijă oglinda în dreptul acelor porțiuni pentru care săgetuțele prezintă o tendință către una din direcții – să zicem, înspre stânga – astfel încât, în linii mari, să rămânem doar cu săgețile orientate în cealaltă direcție (a se vedea Figura 26). Atunci când adunăm doar săgetuțele orientate mai mult sau mai puțin spre dreapta, obținem o serie de depresiuni și o săgeată finală considerabilă – potrivit teoriei, ar trebui să avem acum o reflexie puternică! Și, într-adevăr, avem – teoria este corectă. O astfel de oglindă se numește rețea de difracție, și funcționează de minune.

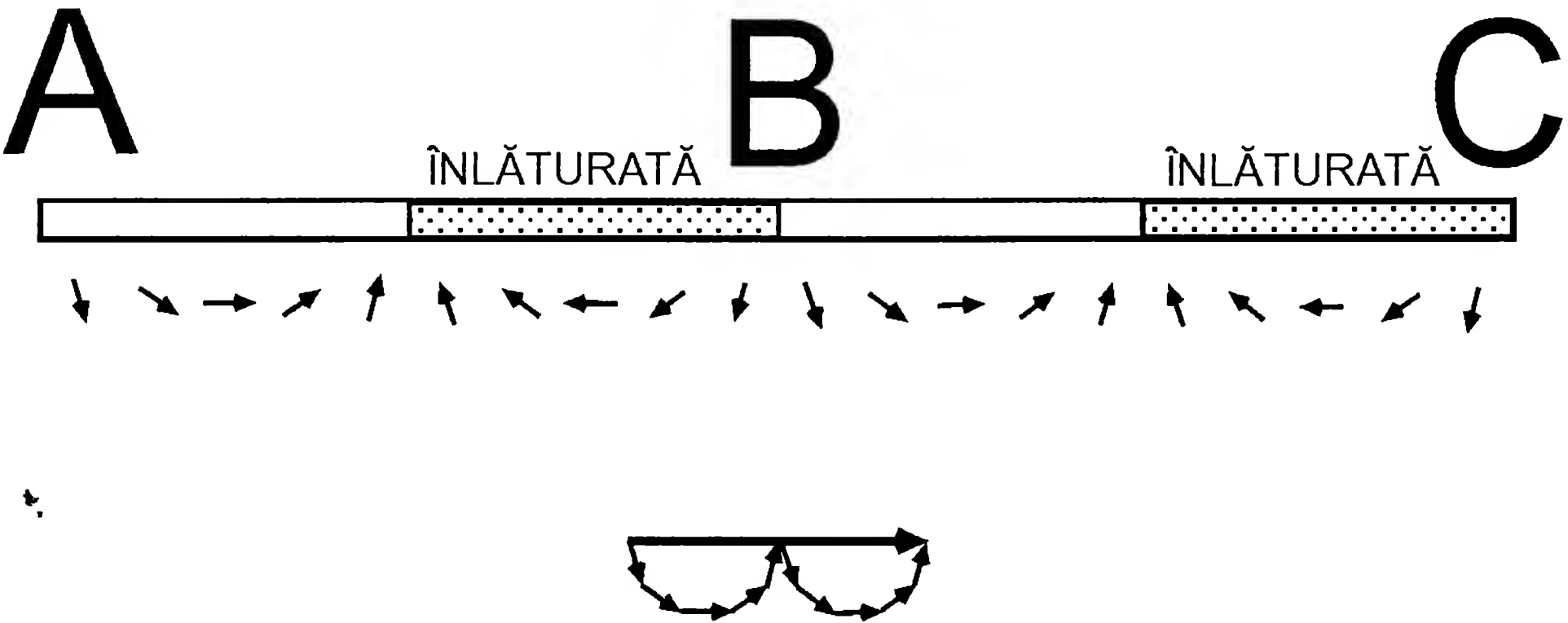
Nu-i așa că este superb – să ai o bucată de oglindă acolo unde nu te-ai aștepta la vreo reflexie, să răzuiești o parte din ea, și ea atunci să reflecte!<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Regiunile oglinzii pentru care săgetuțele sunt orientate în linii mari spre stânga, produc și ele o reflexie puternică (atunci când sunt eliminate regiunile pentru care săgetuțele arată spre dreapta). Anularea apare doar atunci când reflexia se produce și pe unele și pe celelalte. Acest lucru este analog fenomenului de reflexie parțială pe două suprafețe: deși fiecare suprafață reflectă lumina în mod independent, atunci când grosimea are o astfel de valoare încât ele să contribuie cu săgetuțe orientate în direcții opuse, reflexia dispare.



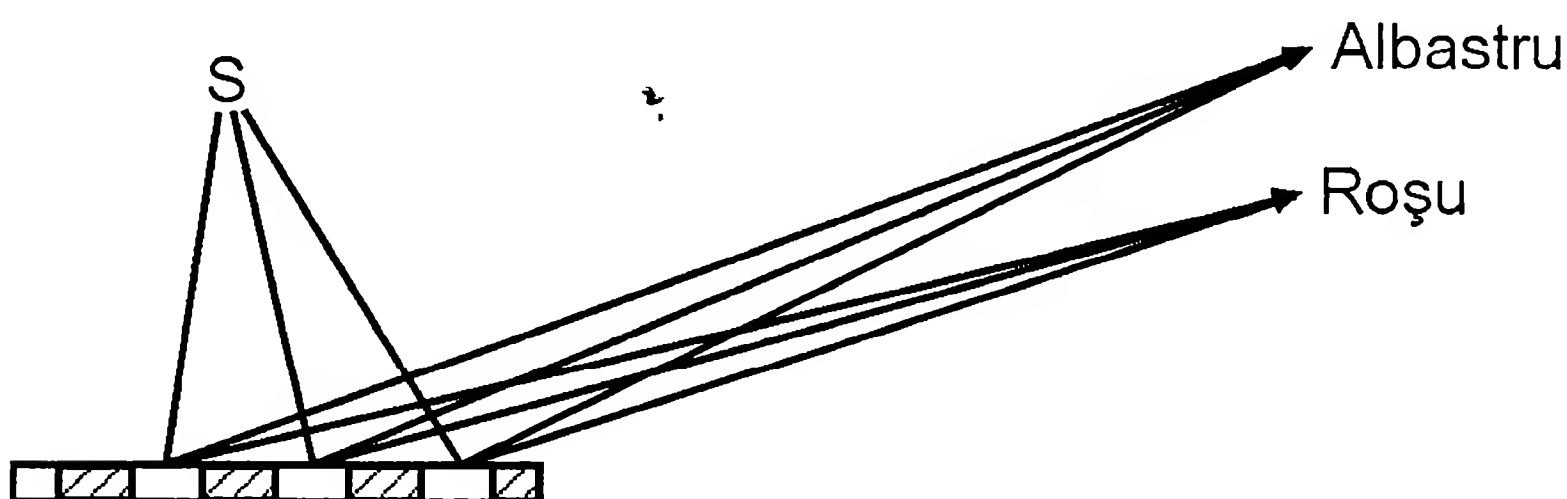
**Figura 25.** Pentru a verifica faptul că, într-adevăr, există reflexie pe capetele oglinzii (dar că pur și simplu ea se anulează), efectuăm un experiment cu o porțiune mare de oglindă, situată incorect în raport cu reflexia de la S la P. Porțiunea respectivă se împarte în secțiuni mult mai mici, astfel încât intervalele de timp corespunzătoare drumurilor învecinate să nu difere foarte mult. Atunci când se adună toate săgetuțele, nu se obține nimic: ele se învârtesc în cerc, dând rezultat aproape nul.



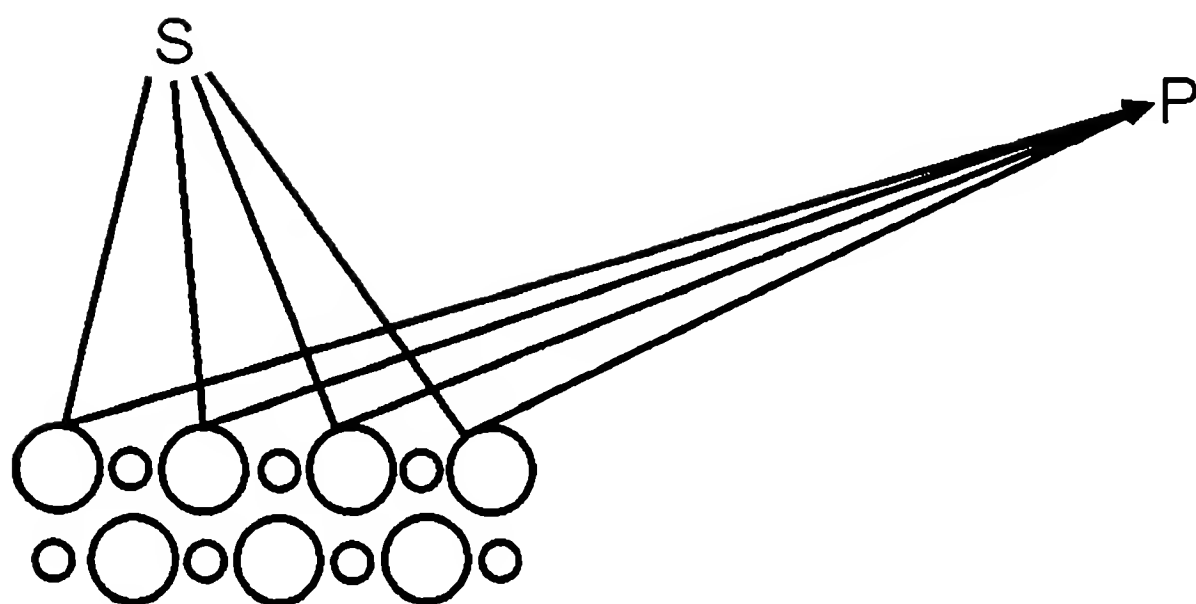
**Figura 26.** Dacă se adună numai săgetuțele cu o tendință către o anumită direcție – de pildă, către dreapta – iar celelalte sunt scoase din calcul (mătuind oglinda în locurile corespunzătoare), atunci, pe o astfel de oglindă plasată incorect, se reflectă o cantitate considerabilă de lumină. O asemenea oglindă cu zgârieturi, se numește rețea de difracție.

Rețeaua de difracție pe care tocmai v-am prezentat-o, a fost realizată special pentru lumină roșie. Ea nu ar funcționa pentru lumină albastră; ar trebui realizată o altă rețea, cu zgârieturi mai apropiate între ele, deoarece v-am spus în prima prelegere că acul cronometrului se rotește mai rapid atunci când măsoară timpii pentru un foton albastru decât pentru unul roșu. Astfel, decupările special trasate pentru rata de rotație „roșie“, nu s-ar potrivi cu locurile corespunzând luminii albastre, iar săgetuțele s-ar încurca unele pe altele, și rețeaua nu ar funcționa cum trebuie. Însă, întâmplător, dacă am coborî fotomultipliatorul la un unghi oarecum diferit, rețeaua realizată pentru lumină roșie ar funcționa atunci pentru lumină albastră. Este doar o potrivire, o consecință accidentală a geometriei implicate în fenomen (a se vedea Figura 27).

Dacă proiectați lumină albă pe o rețea de difracție, lumina roșie se obține într-un anumit loc, lumina portocalie se obține un pic mai sus, apoi, încă și mai sus, urmează lumina galbenă, verde, albastră – toate culorile curcubeului. Acolo unde întâlniți o serie de striuri apropiate între ele – de exemplu, la un disc de pick-up, sau, și mai bine, la un compact disc – puteți adeseori observa spectrul culorilor, atunci când suprafața este puternic iluminată sub anumite unghiuri. Probabil că ați văzut acele superbe abțibilduri argintii (aici, în înșorita Californie, lumea le lipește adesea pe automobile, în spate): atunci când mașina se află în mișcare, se observă culori foarte intense, mergând de la roșu



**Figura 27.** O rețea de difracție cu striatii trasate la distanțe potrivite pentru lumina roșie, poate funcționa și pentru alte culori, cu condiția ca detectorul să se găsească într-o altă poziție. Astfel, în funcție de unghiul de înclinare, este posibil ca pe o suprafață striată – cum ar fi, de pildă, suprafața unui compact disc – să se observe prin reflexie diferite culori.



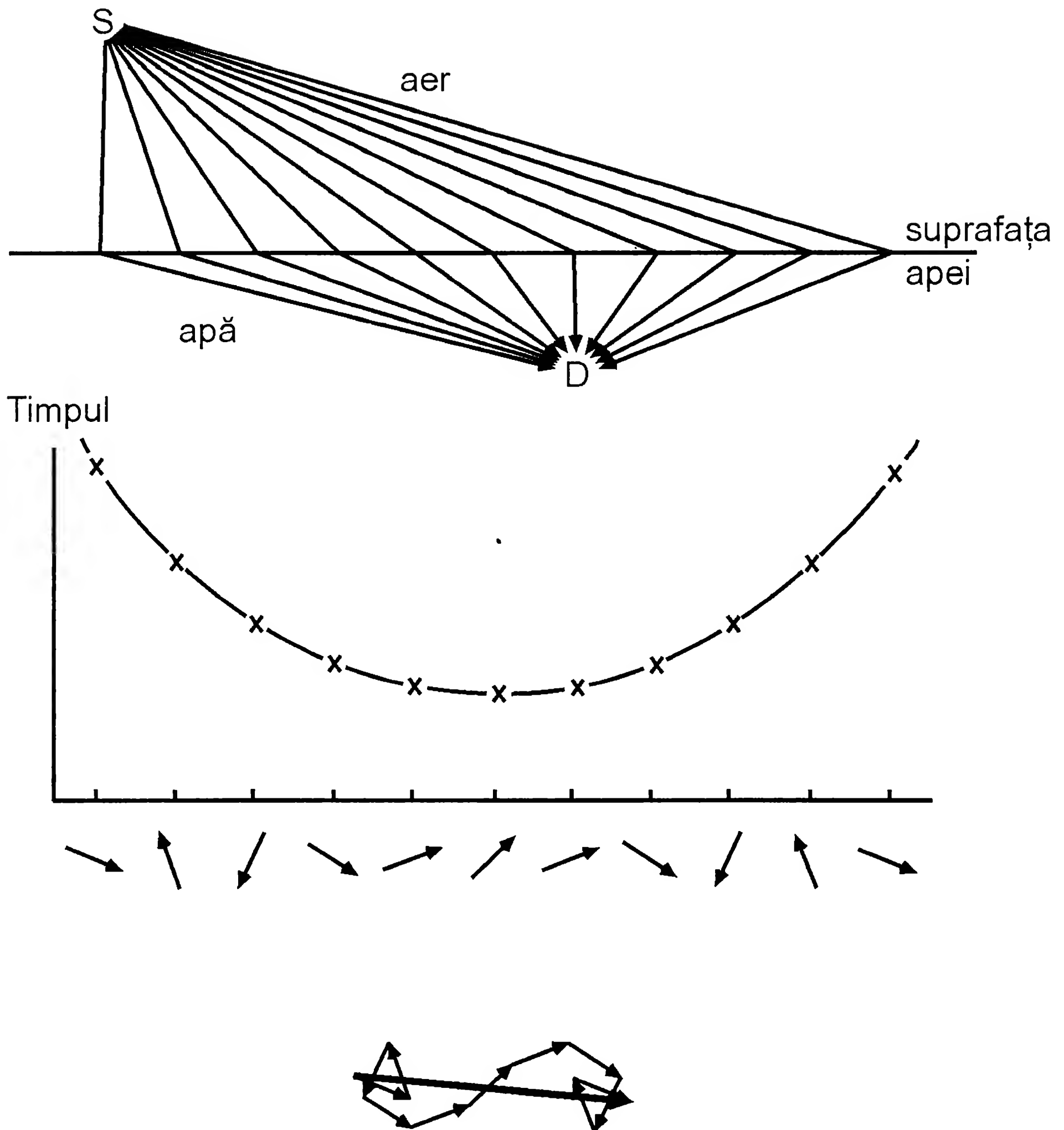
**Figura 28.** Natura a realizat multe tipuri de rețele de difracție, sub formă de cristale. Cristalul de sare reflectă razele X (o lumină pentru care acul cronometrului nostru imaginar se rotește extrem de rapid, aproximativ de 10.000 de ori mai repede decât pentru lumina vizibilă) sub diferite unghiuri, fapt din care se poate determina cu exactitate maniera de dispunere a atomilor și distanțele dintre ei.

la albastru. Acum știți de unde provin aceste culori: aveți în fața ochilor o rețea de difracție – o oglindă zgâriată în locuri bine precizate. Sursa de lumină este Soarele, iar ochii dumneavoastră sunt detectorul. Aș putea continua, explicându-vă cum funcționează laserele și hologramele, dar știu că nu toată lumea a văzut așa ceva, și am multe alte lucruri despre care să vă vorbesc.<sup>2</sup>

Deci, o rețea de difracție ne arată faptul că nu putem ignora părțile de oglindă care nu par să reflecte: dacă prelucrăm oglinda în mod ingenios, putem demonstra veridicitatea reflexiei în toate punctele acesteia, și putem produce anumite fenomene optice surprinzătoare.

---

<sup>2</sup> Nu pot să nu vă spun despre o rețea de difracție realizată de Natură: cristalul de sare, care reprezintă atomi de sodiu și de clor dispuși într-o manieră regulată. Tiparul lui alternat, la fel ca suprafețele noastre striate, acționează precum o rețea de difracție, atunci când asupra lui se proiectează lumină de culoare convenabilă (în cazul acesta, raze X). Determinând locurile anume în care un detector recepționează din plin această reflexie specială (numită difracție), se poate stabili cu exactitate cât de depărtate sunt striatiile între ele și, ca atare, cât de depărtați sunt atomii între ei (a se vedea Figura 28). Este o manieră minunată de a determina structura oricărui cristal și de a confirma faptul că razele X sunt același lucru ca lumina. Astfel de experimente au fost efectuate pentru prima dată în 1914. A fost extrem de pasionant să se observe, pentru prima dată, modul în care atomii sunt dispuși în cadrul diferitor substanțe.



**Figura 29.** Teoria cuantică afirmă că lumina se poate propaga în multe feluri de la o sursă situată în aer la un detector plasat în apă. Dacă simplificăm această chestiune la fel cum am făcut în cazul unei oglinzi, putem trasa graficul intervalului de timp necesar pentru parcurgerea fiecărui drum, iar dedesubt să reprezentăm săgețuța corespunzătoare. Încă o dată, contribuția majoră la lungimea săgeții finale vine din partea acelor drumuri pentru care săgețele sunt îndreptate aproape în aceeași direcție; altfel spus, din partea acelor drumuri pentru care intervalele de timp corespunzătoare sunt aproximativ egale. Și, încă o dată, acest lucru se întâmplă acolo unde timpul este minim.

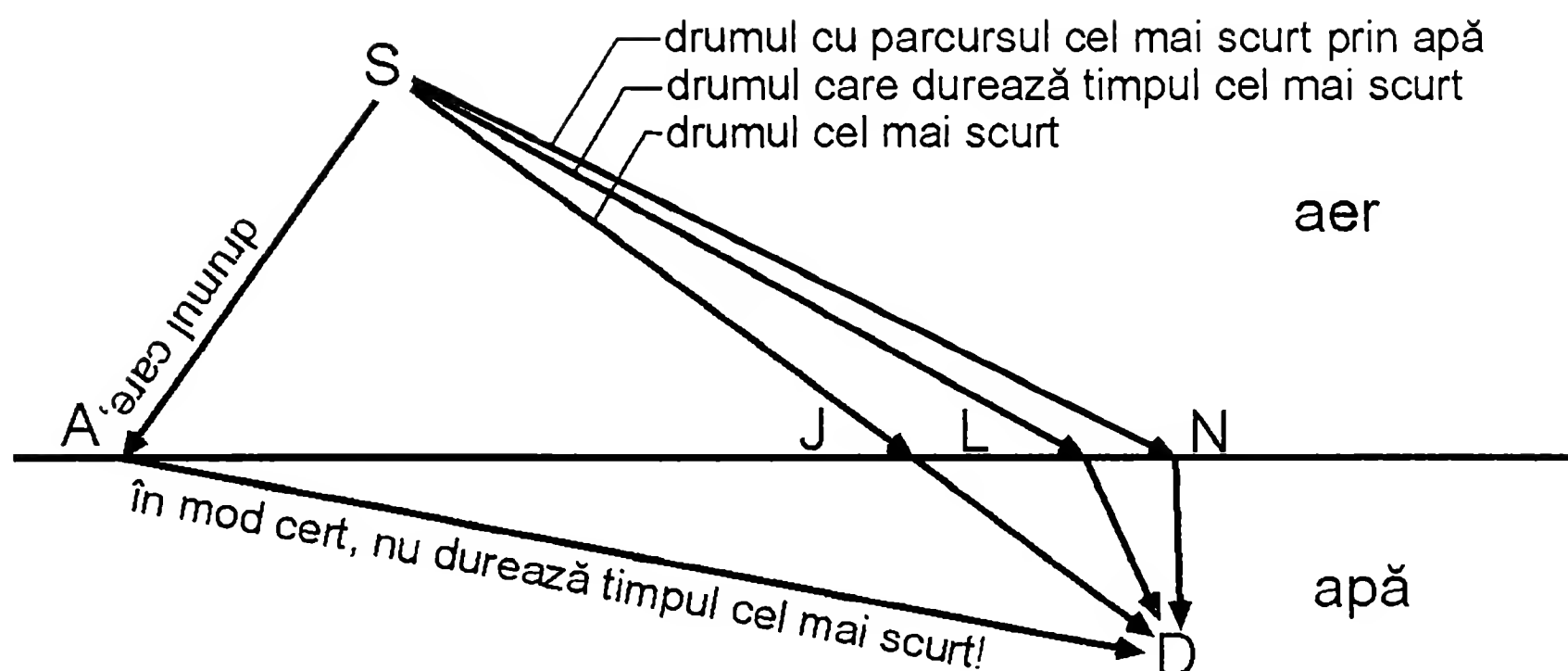


Și mai important încă, demonstrarea veridicității reflexiei pe *orice* porțiune a oglinzii, ne dovedește faptul că există o amplitudine – o săgeată – pentru *fiecare mod* în care se poate petrece un eveniment. Și, pentru a calcula în mod corect probabilitatea unui eveniment în diferite circumstanțe, trebuie să adunăm *toate* modurile în care acel eveniment se poate întâmpla, nu doar pe cele care ni se par nouă importante!

Acuma, aș dori să vă vorbesc despre ceva mai familiar decât rețelele de difracție – despre trecerea luminii din aer în apă. De această dată, haideți să plasăm fotomultiplicatorul sub nivelul apei – presupunem că experimentatorul poate realiza acest lucru! Sursa de lumină este situată în aer, în punctul S, iar detectorul este în apă, în punctul D (a se vedea Figura 29). Încă o dată, vrem să calculăm probabilitatea ca un foton să ajungă de la sursa de lumină la detector. Pentru a face acest calcul, va trebui să luăm în considerare toate drumurile pe care ar putea-o lua lumina. Fiecare modalitate a luminii de a se propaga, contribuie cu o unică săgeată, exact ca în exemplul anterior, toate săgetuțele având lungimi aproape egale. Putem, încă o dată, trasa graficul intervalului de timp necesar unui foton pentru parcurgerea fiecărui drum posibil. Curba graficului va fi foarte asemănătoare cu cea din cazul reflexiei luminii pe o oglindă: începe de la valori mari, apoi scade, după care crește la loc. Contribuțiile cele mai importante vin din partea regiunilor pentru care săgetuțele sunt îndreptate aproape în aceeași direcție (cele pentru care intervalele de timp corespunzătoare drumurilor învecinate diferă cel mai puțin); adică, din partea regiunii inferioare a curbei. Ceea ce înseamnă, de asemenea, de acolo de unde timpul este minim; deci, tot ce avem de făcut, este să găsim pe ce drum anume intervalul de timp este minim.

Se vedește că lumina pare a se propaga mai lent prin apă decât prin aer (motivul pentru aceasta vi-l voi explica în prelegerea următoare), ceea ce face ca distanța parcursă prin apă să fie, ca să zicem așa, mai „costisitoare” din punctul de vedere al timpului necesar, decât distanța parcursă prin aer. Nu este greu de realizat care este drumul ce necesită cel mai scurt timp: să presupunem că dumneavoastră sunteți salvamarul, și vă aflați în punctul S, iar fata frumoasă este în pericol să se înece în punctul D (a se vedea Figura 30). Pe uscat puteți alerga mai repede decât puteți înota în apă. Problema care se pune este în ce punct trebuie să intrați în apă pentru a ajunge cel mai repede la victima care stă să se înece. Alergați oare spre apă până în punctul A,

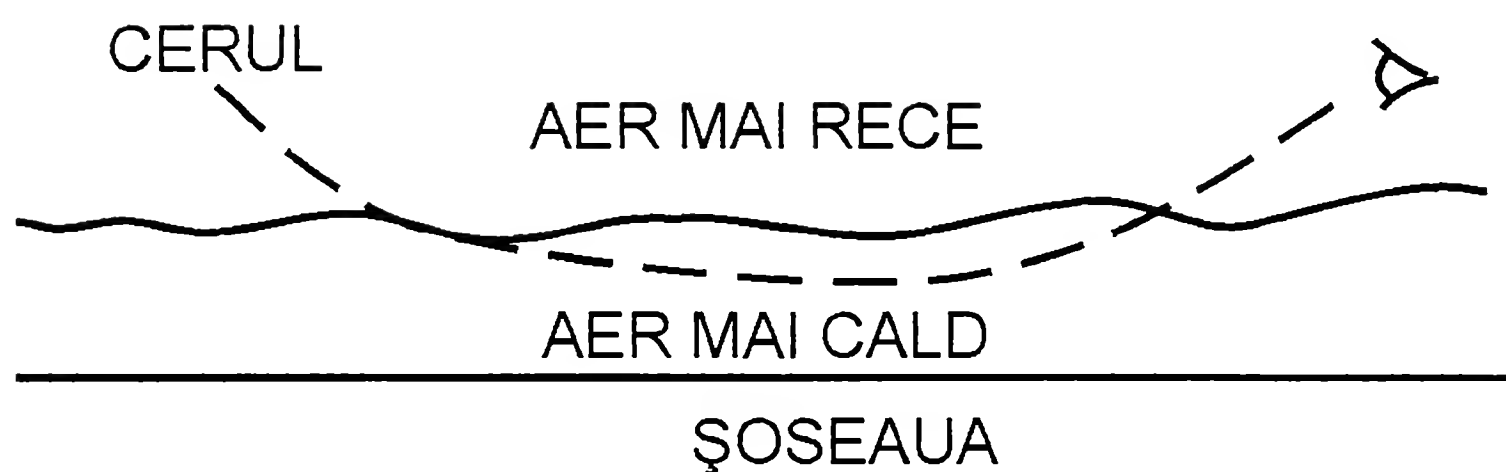




**Figura 30.** Găsirea drumului care să-i ia luminii cel mai scurt timp, este analoagă cu găsirea drumului pe care un salvamar să ajungă cel mai repede în ajutorul unei victime ce stă să se înece: drumul cu distanța cea mai mică, include o porțiune prea lungă prin apă; drumul cu cea mai scurtă porțiune prin apă, include o porțiune prea mare pe uscat; drumul corespunzător timpului minim este un compromis între acestea două.

după care înotați de acolo de mama focului? Bineînțeles că nu. Dar nici dacă alergați direct spre victimă și intrați în apă în punctul J, nu urmați cea mai rapidă rută. Chiar dacă pentru un salvamar, în circumstanțele respective, ar fi o prostie să stea să analizeze și să calculeze acest lucru, există o poziție bine precizată de intrare în apă, pentru care timpul este minim: este vorba de un compromis între drumul direct, care trece prin J, și drumul cu cea mai mică distanță prin apă, cel trecând prin punctul N. Și la fel stau lucrurile și cu lumina – drumul corespunzător timpului minim intră în apă printr-un punct între J și N, cum ar fi L.

Un alt fenomen luminos pe care aș dori să vi-l menționez pe scurt este fata-morgana. Atunci când mergeți cu mașina pe o șosea foarte fierbinte, se poate întâmpla uneori să vi se pară că vedeți drumul ud. Ceea ce vedeți de fapt este cerul, iar dumneavoastră considerați că el se observă din cauză că pe asfalt ar fi băltoace cu apă (reflexia parțială a luminii pe o suprafață singulară). Dar cum de puteți vedea cerul pe șosea, dacă aceasta nu este udă? Trebuie să știți că prin aerul

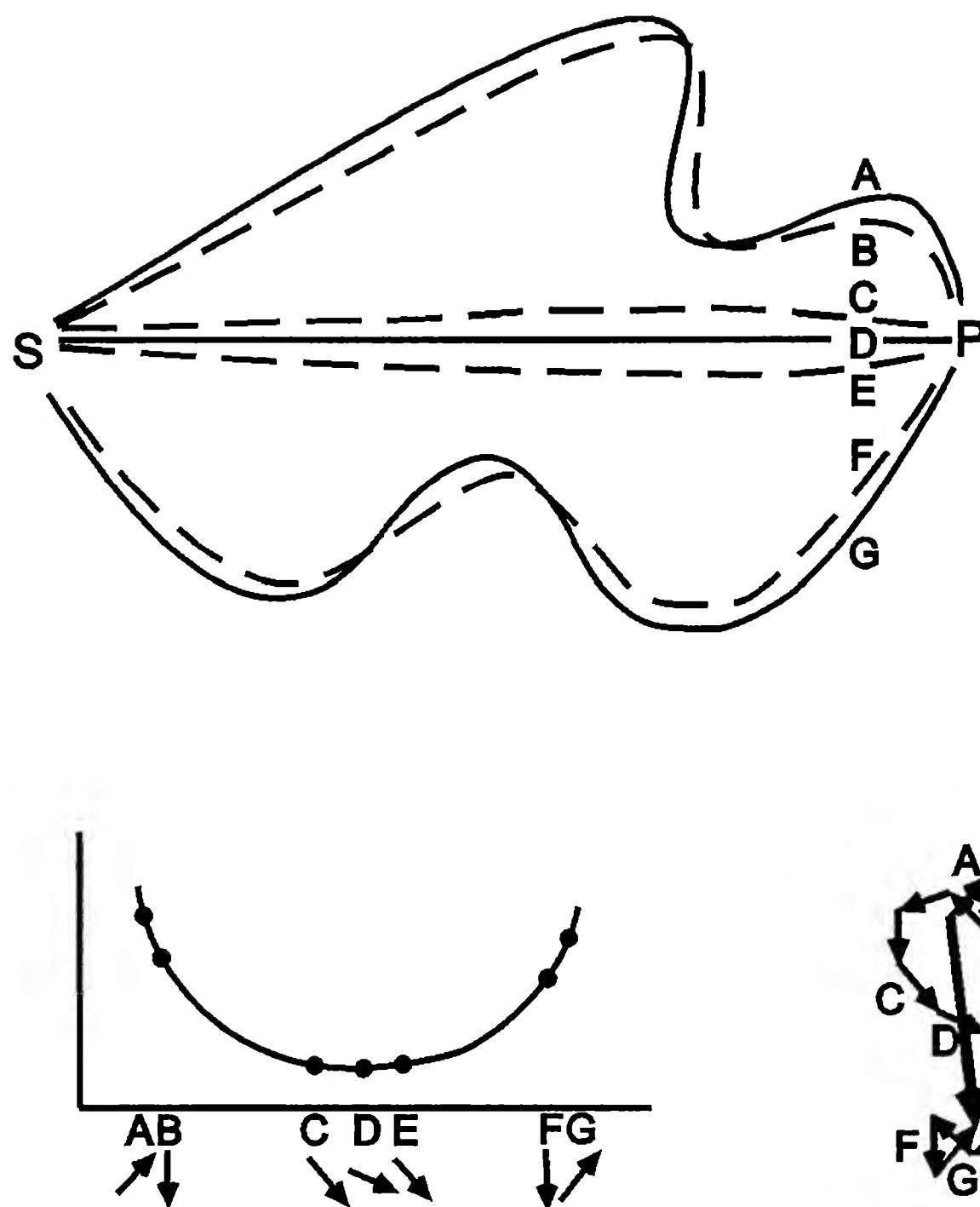


**Figura 31.** Producerea fenomenului de fata-morgana se poate explica determinând drumul corespunzător timpului minim. Lumina se propagă mai rapid prin aerul cald decât prin cel rece. O parte a cerului apare ca văzându-se pe șosea, deoarece parte din lumină ajunge la ochi venind de jos în sus. Singura altă situație în care cerul se vede reflectat pe șosea, este atunci când aceasta este udă, și astfel se creează mirajul că pe drum sunt băltoace cu apă.

rece lumina se propagă mai lent decât prin aerul încins, și, pentru ca mirajul să fie vizibil, observatorul trebuie să se găsească în stratul de aer mai rece, de deasupra celui foarte fierbinte de la nivelul șoselei (a se vedea Figura 31). Putem înțelege cum de este posibil să te uiți *în jos* și să vezi cerul, dacă trasăm drumul corespunzător timpului minim. Am să vă las pe dumneavoastră să vă distrați cu chestia aceasta acasă – este interesant de analizat, și vă puteți prinde singuri foarte ușor.

În exemplele pe care vi le-am prezentat, în care lumina se reflectă pe o oglindă și, respectiv, trece din aer în apă, am făcut o aproximare, din dorința de a simplifica lucrurile: am desenat diferitele drumuri pe care se putea propaga lumina, ca pe două segmente de dreaptă, formând un anumit unghi între ele. Dar nu este nevoie să *presupunem* că într-un mediu uniform cum ar fi apa ori aerul, lumina se propagă în linie dreaptă: chiar și *acest lucru* este explicabil prin intermediul principiului general al teoriei cuantice, potrivit căruia probabilitatea unui eveniment se determină adunând săgețele corespunzătoare *tuturor* modurilor în care evenimentul se poate petrece.

Așa încât, în următorul nostru exemplu, vă voi prezenta maniera în care, adunând săgețe, ne poate apărea că lumina se propagă în linie dreaptă. Haideți să considerăm o sursă și un fotomultiplicator, plasate în punctele S și respectiv P (a se vedea Figura 32), și să urmărim *toate*



**Figura 32.** Teoria cuantică poate fi utilizată pentru a arăta din ce cauză ni se pare că lumina se propagă în linie dreaptă. Dacă se consideră toate drumurile posibile, atunci fiecărui drum întortocheat, îi corespunde unul învecinat având o lungime substanțial mai mică și, în consecință, un timp de parcurgere mult mai mic (și o direcție mult diferită a săgetuței respective). Doar drumurile apropiate de linia dreaptă D au săgetuțele orientate aproape în aceeași direcție, deoarece doar ele au timpi de parcurgere aproximativ egali. Doar aceste săgetuțe au importanță, pentru că numai din adunarea lor se obține săgeata finală lungă.

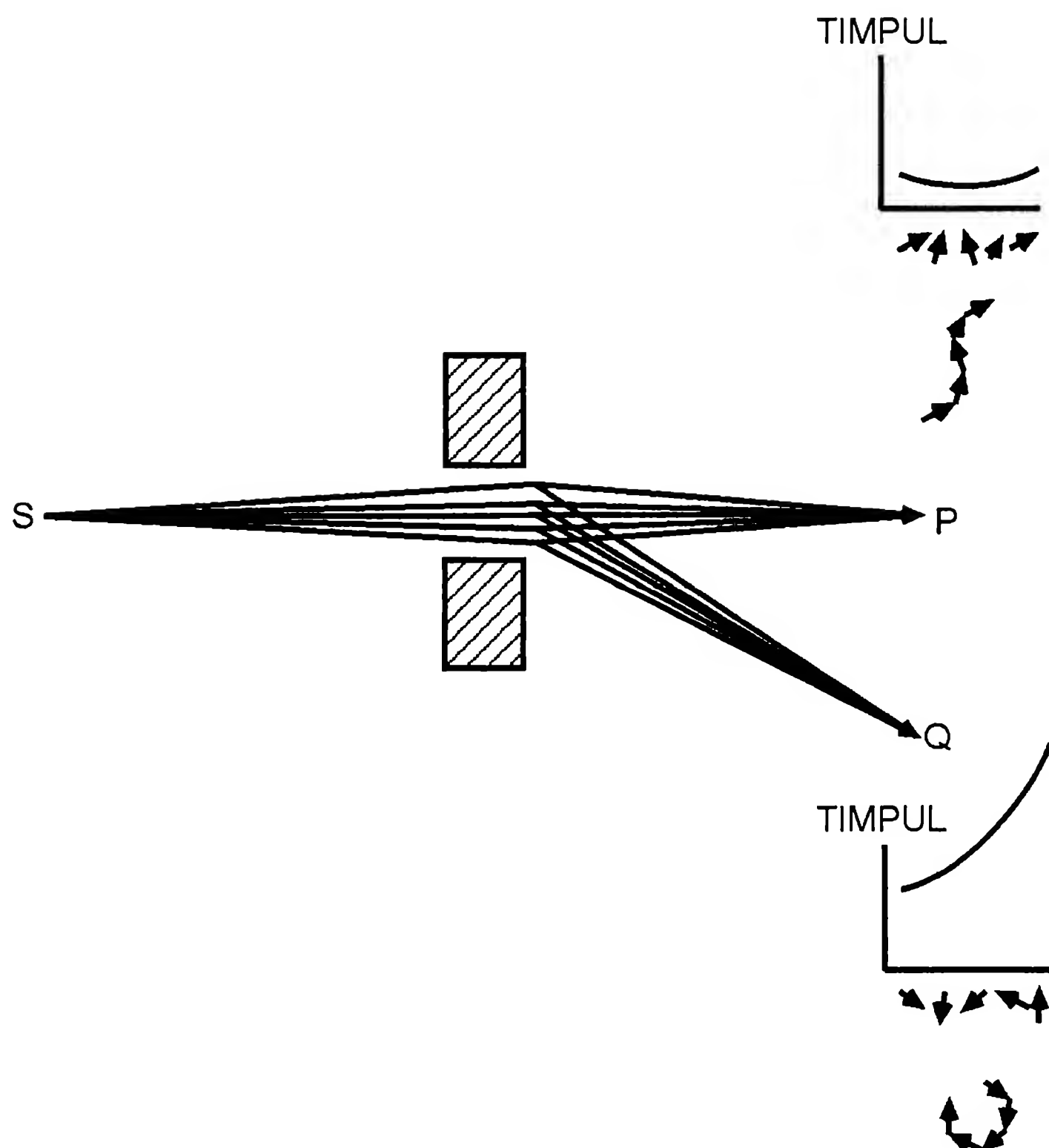
modurile - drumurile întortocheate în toate felurile - în care lumina s-ar putea propaga de la sursă la detector. Să desenăm apoi câte o săgetuță pentru fiecare drum, și să spunem lecția învățată bine!

Pentru fiecare drum întortocheat, cum ar fi drumul A, există un drum învecinat un pic mai drept și sensibil mai scurt - adică, un drum ce durează mult mai puțin. Însă, atunci când drumurile devin aproape drepte - în cazul lui C, de pildă - un drum învecinat și mai drept necesită pentru parcurgere aproape același interval de timp. Aceasta este situația în care, în loc să se anuleze între ele, săgetuțele conlucrează; acesta este drumul pe care o ia lumina.

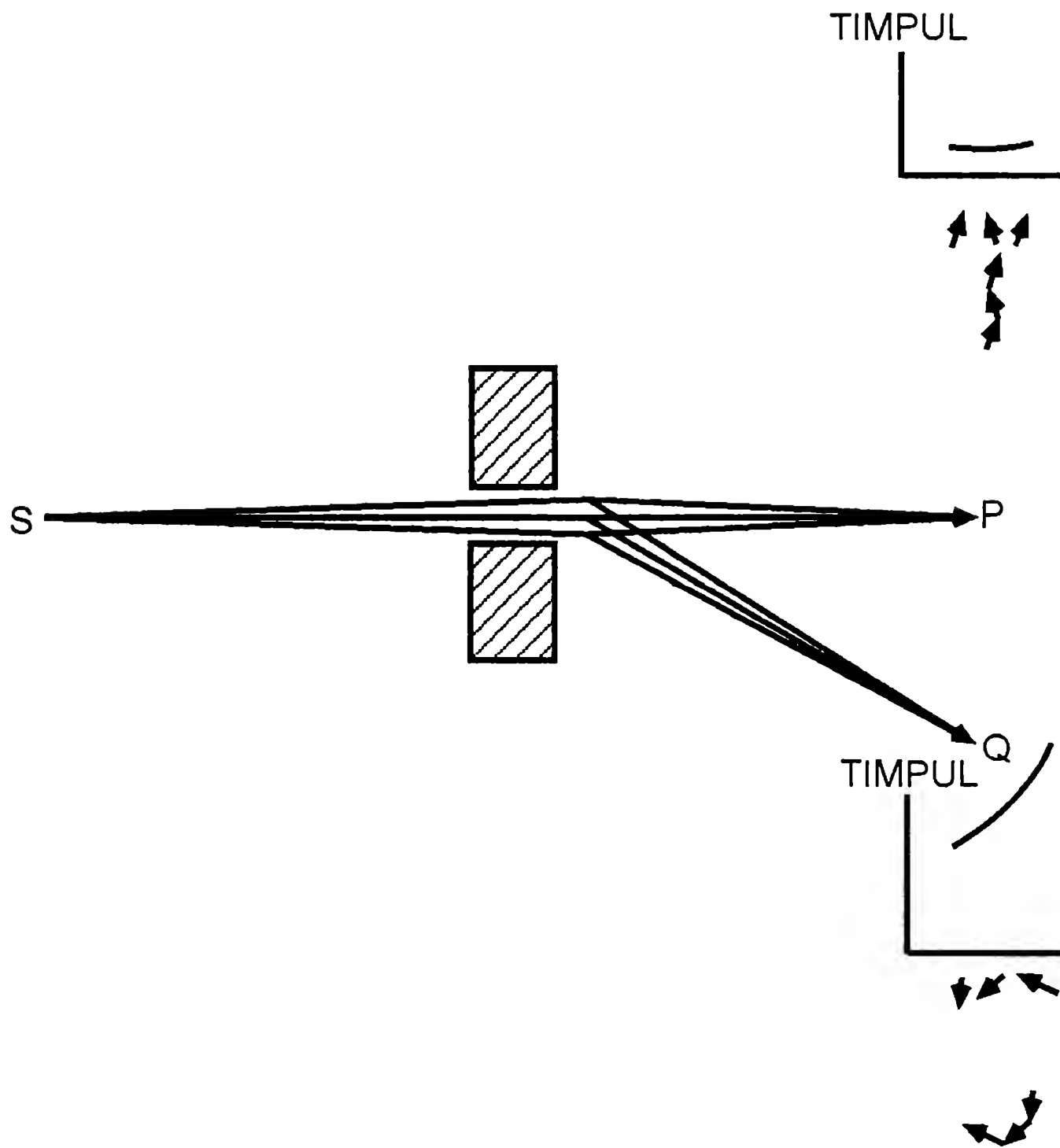
Este important de subliniat faptul că săgetuța singulară corespunzând drumului în linie dreaptă D (a se vedea Figura 32), nu este suficientă pentru a da socoteală de probabilitatea ca lumina să se propage de la sursă la detector. Contribuții importante au și drumurile învecinate - de exemplu, C și E - aproape drepte. Deci, lumina nu se propagă *realmente* doar în linie dreaptă; ea „adulmecă” drumurile din jurul ei, și face uz de o mică vecinătate concentrată din spațiu. (În același fel, pentru a reflecta în mod corespunzător, o oglindă trebuie să aibă suficientă întindere: dacă dimensiunile ei sunt prea mici în comparație cu fasciculul de drumuri învecinate, lumina se împrășteie într-o mulțime de direcții, indiferent de locul în care oglinda este așezată.)

Haideți să investigăm mai de aproape acest miez de lumină. Luăm o sursă S și un fotomultiplicator P, iar între ele plasăm două blocuri masive, care să împiedice răspândirea prea mare a luminii (a se vedea Figura 33). Acum, haideți să plasăm un al doilea fotomultiplicator în punctul Q, mai jos de P, și să presupunem din nou, pentru simplitate, că lumina poate ajunge din S în Q doar de-a lungul unor drumuri de forma a două segmente de dreaptă, dispuse sub un anumit unghi unul față de celălalt. Ce se întâmplă în acest caz? Atunci când spațiul dintre blocuri este suficient de larg pentru a permite numeroase drumuri învecinate către P și către Q, săgetuțele corespunzătoare drumurilor către P se adună între ele (deoarece toate durează aproximativ același timp), pe când cele corespunzătoare drumurilor către Q se anulează între ele (pentru că prezintă diferențe de timp substanțiale). Și astfel, fotomultiplicatorul din Q nu produce clicuri.

Dar, pe măsură ce apropiem blocurile unul de altul, la un moment dat, detectorul din Q începe să producă clicuri! Atunci când spațiul dintre blocuri dispare aproape complet, și mai există doar câteva drumuri învecinate, săgetuțele drumurilor spre Q se adună și acestea, deoarece aproape că nu mai există diferență de timp între ele (a se vedea Figura 34). Desigur, ambele săgeți finale sunt miciute, pentru că



**Figura 33.** Lumina nu se propagă doar de-a lungul drumului în linie dreaptă, ci și de-a lungul drumurilor învecinate lui. Atunci când două blocuri masive sunt dispuse în calea luminii la o distanță suficient de mare unul de altul pentru a permite aceste drumuri învecinate, mai toții fotonii ajung, așa cum este normal, în punctul *P*, și abia dacă ajung câțiva în *Q*.



**Figura 34.** Atunci când lumina este constrânsă atât de mult încât rămân doar puține drumuri posibile, partea care reușește să treacă prin deschizătura îngustă, ajunge în punctul Q aproape la fel de mult ca în punctul P, deoarece nu mai există suficiente săgetuțe corespunzătoare drumurilor către Q care să se anuleze reciproc.

prin acel spațiu îngust nu poate trece multă lumină, dar detectorul din Q clicăie aproape la fel de mult ca cel din P. Deci, atunci când încercați să storciți lumina foarte mult, pentru a vă asigura că ea se propagă doar în linie dreaptă, aceasta refuză să coopereze, începând să se împrășteie.<sup>3</sup>

Așadar, ideea că lumina se propagă în linie dreaptă reprezintă o aproximare, convenabilă pentru a descrie lucrurile familiare nouă ce se întâmplă în natură; ea este similară aproximării grosolane potrivit căreia, atunci când lumina se reflectă pe o oglindă, unghiul de incidență este egal cu unghiul de reflexie.

Exact așa cum am fost în stare, printr-o șmecherie isteată, să concepem că lumina se reflectă pe o oglindă sub diferite unghiuri, tot la fel putem face o scamatorie asemănătoare prin care lumina să se propage dintr-un punct în altul pe multe drumuri.

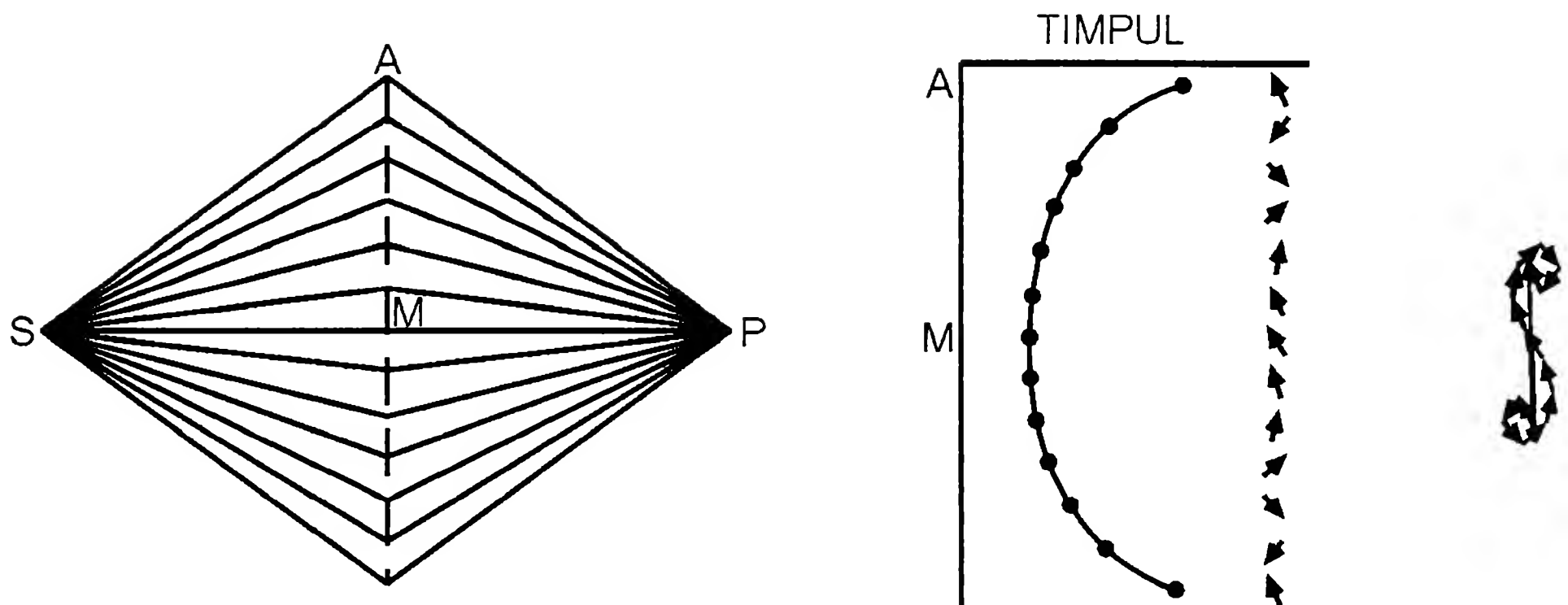
Mai întâi, pentru a simplifica situația, voi desena o linie punctată (a se vedea Figura 35) între sursa de lumină și detector (linia nu are nicio semnificație concretă, este o pură abstracțiune) și voi afirma că singurele drumuri pe care le vom studia sunt cele alcătuite din două segmente de dreaptă formând un anumit unghi. Graficul reprezentând timpii necesari parcurgerii fiecărui drum arată la fel ca în cazul oglinzii (însă de această dată îl voi desena în lateral): curba pornește de la o valoare mare, pentru drumul A, după care coboară, deoarece drumurile din mijloc sunt mai scurte și necesită mai puțin timp. În final, curba crește la loc.

Acum, haideți să ne distrăm puțin. Haideți să „păcălim lumina”, astfel încât *toate* drumurile să dureze exact la fel. Cum putem face asta? Cum putem face ca cel mai scurt drum, cel ce trece prin punctul M, să dureze exact același timp cât cel mai lung, prin punctul A?

---

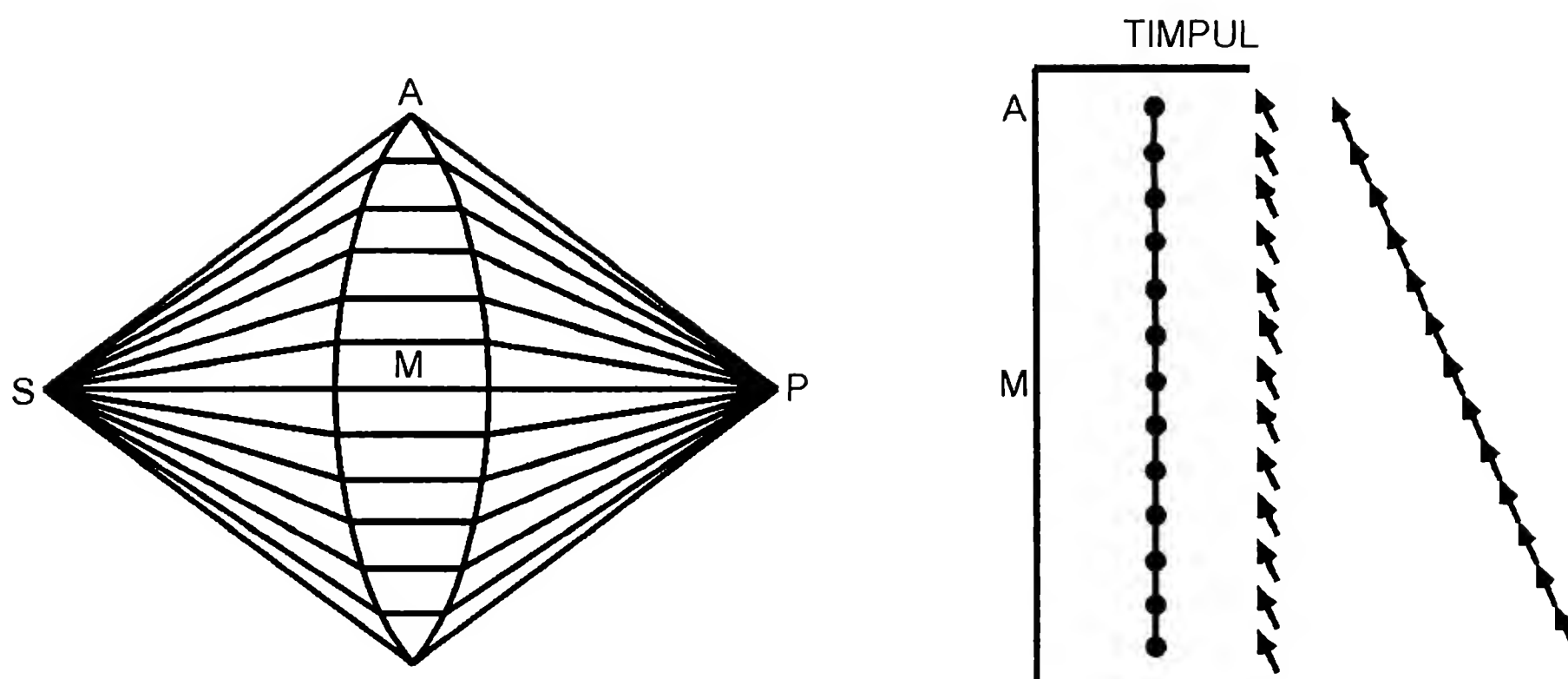
<sup>3</sup> Acest fapt constituie un exemplu de acțiune a „Principiului de Incertitudine”: există un soi de „complementaritate” între cunoașterea locului pe unde trece lumina printre cele două blocuri, și cunoașterea locului unde ajunge ea după aceea – nu este posibilă cunoașterea precisă a ambelor. Aș dori să plasez Principiul Incertitudinii în contextul său istoric. Atunci când au început să se cristalizeze revoluționarele idei ale fizicii cuantice, lumea încă încerca să le înțeleagă în termenii conceptelor demodate (cum ar fi cel că lumina se propagă în linie dreaptă). Dar, la un moment dat, conceptele vechi au început să se năruiască, așa încât s-a lansat un avertisment care a afirmat fățiș că „ideile demodate sunt bune de aruncat în situațiile în care...” Dacă renunțați la toate aceste idei învechite și în locul lor utilizați conceptele pe care vi le prezint eu în aceste prelegeri – adunarea de *săgetuțe* pentru fiecare mod în care se poate petrece un eveniment – nu este nevoie de un Principiu al Incertitudinii!





**Figura 35.** Pentru simplificarea analizării tuturor drumurilor posibile de la S la P, le luăm în discuție doar pe cele alcătuite din câte două segmente de dreaptă (într-un singur plan). Efectul este același ca și în cazul real, mai complex: avem de-a face cu o curbă a timpului prezentând un minim, acolo de unde provine cea mai mare parte a contribuției la săgeata finală.

Ei bine, prin apă lumina se propagă mai lent decât prin aer; la fel și prin sticlă (care este mult mai ușor de prelucrat decât apa!). Deci, dacă pe parcursul drumului cel mai scurt, cel care trece prin punctul M, intercalăm un strat de sticlă de grosime foarte bine determinată, putem face ca timpul necesar parcurgerii acestui drum să fie absolut egal cu cel pentru drumul prin A. Drumurile vecine cu cel ce trece prin M, care sunt doar cu un pic mai lungi, nu vor necesita un strat de sticlă chiar la fel de gros (a se vedea Figura 36). Cu cât ne apropiem de punctul A, cu atât trebuie să intercalăm mai puțină sticlă pentru a încetini propagarea luminii. Calculând cu atenție și introducând exact grosimea de sticlă necesară, putem compensa timpii necesari luminii de-a lungul tuturor drumurilor, și putem face ca toți aceștia să fie egali. Dacă desenăm săgețuțele pentru fiecare manieră în care se poate propaga lumina, descoperim că am reușit să le orientăm pe toate la fel – și există, efectiv, *milioane* de săgeți minuscule – și astfel rezultatul pe ansamblu este unul absolut neașteptat: o săgeată finală cât se poate de lungă! Știți, desigur, la ce mă refer: este vorba despre o lentilă convergentă. Aranjând în așa fel lucrurile încât toate intervalele de timp să fie egale, noi putem focaliza lumina – putem face ca



**Figura 36.** Putem să-i jucăm Naturii o „festă”, încetinind lumina care o ia pe drumurile mai scurte: se intercalează un strat de sticlă de grosime corespunzătoare, astfel încât parcurgerea oricărui drum să necesite exact același interval de timp. Aceasta face ca toate săgetuțele să fie orientate în aceeași direcție și să dea naștere unei ditamai săgeți finale – unei lumini intense! O astfel de bucată de sticlă, menită să mărească foarte mult probabilitatea ca lumina să ajungă de la sursă la un anumit punct singular din spațiu, se numește lentilă convergentă

probabilitatea ca lumina să ajungă într-un anumit punct să fie foarte mare, iar probabilitatea să ajungă oriunde altundeva să fie foarte mică.

Am făcut uz de aceste exemple pentru a vă prezenta modul în care teoria electrodinamicii cuantice, care la început arată ca o idee absurdă, fără cauzalitate, fără nici un mecanism lăuntric, complet ruptă de realitate, conduce în final la efecte ce vă sunt familiare: lumina ricoșând de o oglindă, lumina frângându-se atunci când trece din aer în apă, lumina focalizându-se printr-o lentilă, etc. Teoria mai generează și efecte pe care se poate să nu le fi observat vreodată, cum ar fi cel dat de rețeaua de difracție și altele. În fapt, electrodinamica cuantică explică în continuare cu succes *toate* fenomenele legate de lumină.

V-am prezentat niște exemple cu privire la felul în care se calculează probabilitatea unui eveniment ce se poate petrece în *maniere alternative*: se desenează câte o săgeată pentru fiecare mod în care se

poate întâmpla evenimentul, și se adună săgețile. „Adunarea săgeților“ vrea să spună că ele sunt plasate cap la cap și că se trasează o „săgeată finală“. Pătratul lungimii ei reprezintă probabilitatea evenimentului.

În scopul de a vă oferi posibilitatea să simțiți cât mai deplin gustul teoriei cuantice, aș dori acum să vă prezint maniera în care fizicienii calculează probabilitatea evenimentelor compuse – a evenimentelor ce pot fi reduse la un număr de pași, sau care constau dintr-un număr de lucruri ce se pot întâmpla în mod independent.

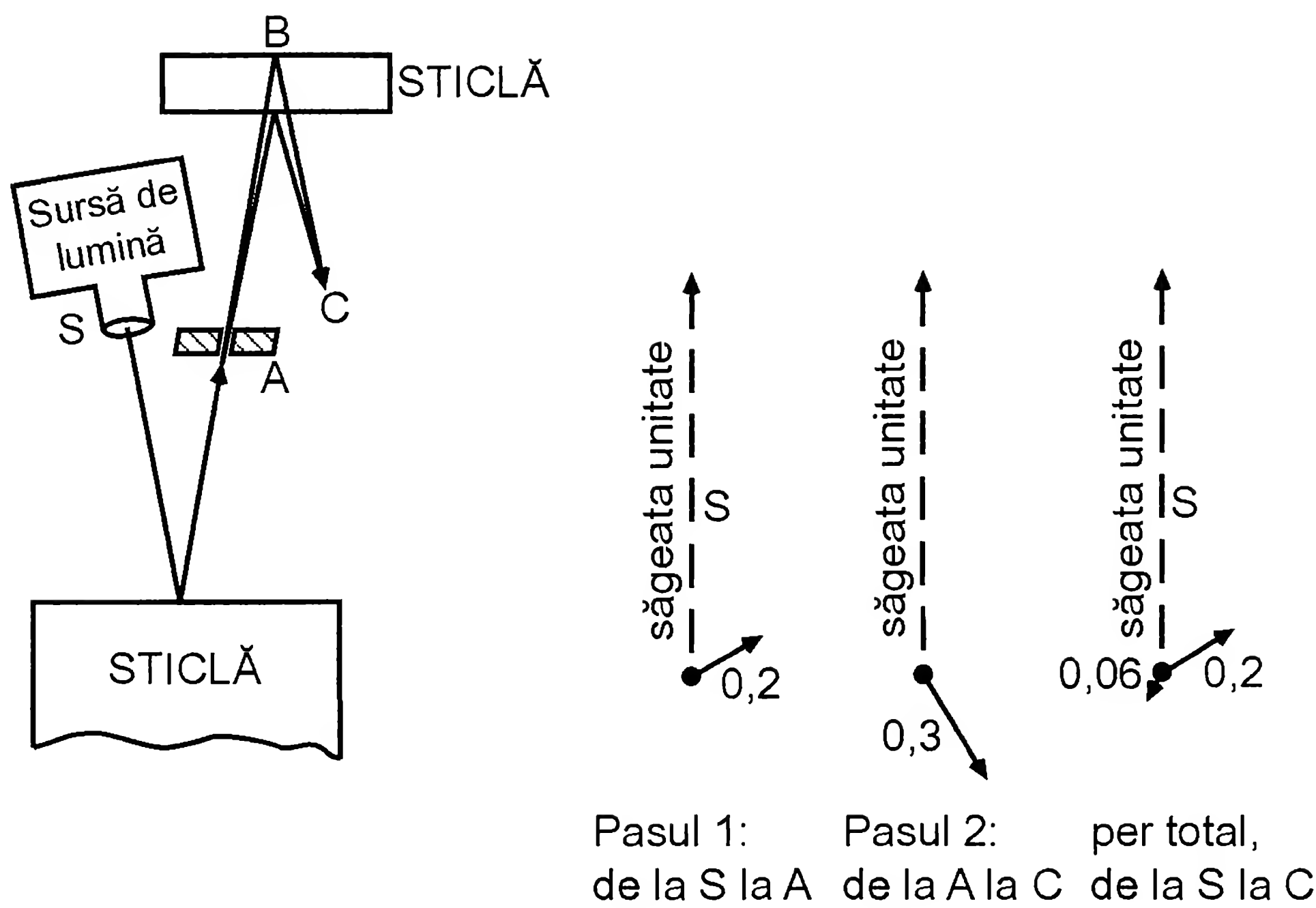
Un exemplu de eveniment compus se poate obține dacă modificăm primul nostru experiment, cel în care proiectam fotoni roșii pe o suprafață singulară de sticlă și măsurăm reflexia parțială. În loc să plasăm fotomultiplicatorul în punctul A, haideți să punem acolo un paravan cu o gaură în el (a se vedea Figura 37), care să lase să treacă fotonii ce ajung în A. Apoi, să așezăm în B o placă de sticlă și să montăm fotomultiplicatorul în punctul C. Cum determinăm probabilitatea ca un foton să ajungă de la sursă la C?

Putem gândi acest eveniment ca o secvență de doi pași. Pasul 1: fotonul ajunge de la sursă la punctul A, prin reflexie pe suprafața singulară de sticlă. Pasul 2: fotonul se deplasează de la A la fotomultiplicatorul din C, reflectându-se pe placa de sticlă B. Fiecărui pas îi corespunde o săgeată finală – o „*amplitudine*“ (voi folosi cele două cuvinte deopotrivă) – ce poate fi calculată potrivit regulilor învățate până aici. Amplitudinea pentru primul pas are lungimea egală cu 0,2 (pătratul ei, probabilitatea de reflexie pe o suprafață singulară de sticlă, are valoarea 0,04). Săgeata corespunzătoare este îndreptată într-o anumită direcție – să zicem, înspre ora 2, cum ne uităm la ceas (a se vedea Figura 37).

Pentru a calcula amplitudinea corespunzătoare celui de-al doilea pas, vom așeza cu titlu provizoriu sursa în punctul A și vom proiecta fotonii înspre lama de sticlă de deasupra. Desenăm săgețile corespunzătoare reflexiilor pe cele două suprafețe, inferioară și superioară, și le adunăm – haideți să zicem că săgeata finală are lungimea 0,3 și este orientată la ora 5.

Acuma, cum combinăm noi cele două săgeți pentru a trasa amplitudinea întregului eveniment? Interpretăm fiecare săgeată într-un nou fel: ca pe niște instrucțiuni referitoare la o *contracție* și o *rotire*.

În exemplul de față, prima amplitudine are lungimea 0,2 și este orientată la ora 2. Dacă pornim de la o „săgeată unitate“ – o săgeată cu lungimea 1, orientată drept în sus – putem *comprima* săgeata până se ajunge la lungimea 0,2, și o putem *roti* până arată ora 2. Amplitudinea



**Figura 37.** Un eveniment compus poate fi analizat ca o succesiune de pași. În acest exemplu, drumul unui foton de la S la C poate fi împărțit în doi pași: 1) fotonul ajunge din S în A, și 2) fotonul ajunge din A în C. Fiecare pas poate fi analizat separat, generând câte o săgeată ce poate fi privită într-un nou fel: ca o săgeată unitate (o săgeată cu lungimea 1, orientată înspre ora 12) care a suferit o contracție și o rotire. În acest exemplu, pentru pasul 1, contracția și rotirea sunt în proporție de 0,2 și respectiv înspre ora 2, iar pentru pasul 2, ele sunt în proporție de 0,3 și respectiv înspre ora 5. Pentru a obține amplitudinea succesiunii de pași, aplicăm în mod consecutiv cele două contracții și cele două rotiri: săgeata unitate este comprimată și rotită până ajunge de lungime 0,2 și orientată la ora 2, iar săgeata astfel rezultată este la rândul ei comprimată și rotită (ca și când ar fi o săgeată unitate) ajungându-se în final la lungimea 0,06 și orientarea înspre ora 7. Acest procedeu de comprimări și rotiri succesive se numește „înmulțirea” săgeților.

pentru al doilea pas poate fi gândită ca o contracție a săgeții unitate de la lungimea 1 la lungimea 0,3, și o rotire a ei de la ora 12 la ora 5.

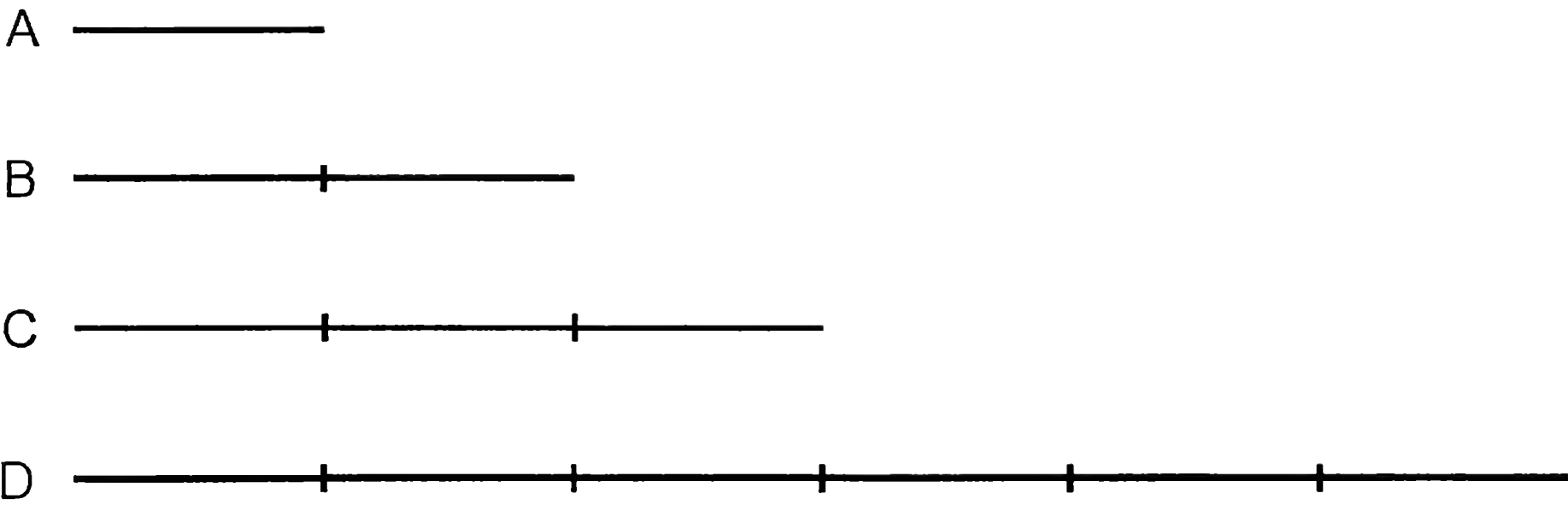
Acuma, pentru a combina amplitudinile ambilor pași, comprimăm săgeata unitate până când ajunge la lungimea 0,2 și o rotim de la ora 12 la ora 2; apoi, o comprimăm mai departe, de la lungimea 0,2 până la trei zecimi din această lungime, și o rotim mai departe, cu cantitatea cuprinsă între ora 12 și ora 5 – adică, o rotim de la ora 2 la ora 7. Săgeata resultantă are lungimea 0,06 și arată spre ora 7. Ea reprezintă o probabilitate egală cu 0,06 ridicat la pătrat, adică 0,0036.

Dacă observăm săgețile cu atenție, sesizăm că rezultatul comprimării și rotirii succesive de două ori a săgeții unitate, este același ca în cazul adunării unghiurilor (ora 2 + ora 5) și înmulțirii lungimilor ( $0,2 \times 0,3$ ). Este ușor de înțeles de ce adunăm unghiurile: unghiul unei săgeți este determinat de cantitatea cu care se rotește acul cronometrului imaginar. Deci, cantitatea totală cu care se rotește acesta în cei doi pași succesivi este pur și simplu suma cantităților cu care el se rotește la fiecare pas în parte.

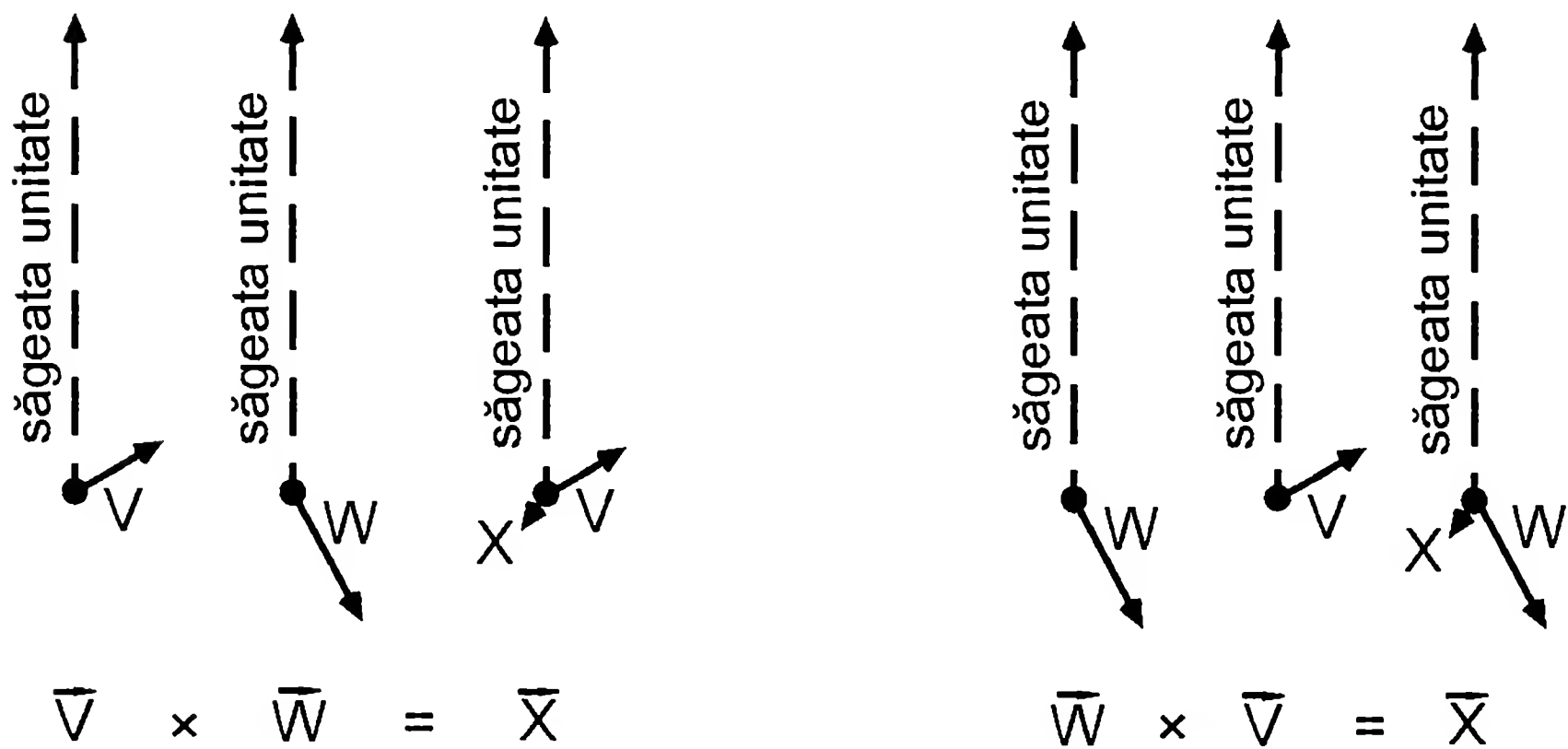
Motivul pentru care numim noi acest procedeu „înmulțirea săgeților” este unul care reclamă explicații ceva mai amănunțite, dar este interesant. Haideți pentru moment să privim operația de înmulțire din punctul de vedere al grecilor antici (partea aceasta nu are vreo legătură cu prelegerea propriu-zisă). Grecii antici urmăreau să utilizeze numere nu neapărat întregi, și, ca urmare, ei le reprezentau prin segmente de dreaptă. Orice număr poate fi exprimat ca o *transformare* a segmentului unitate – o comprimare sau o alungire a acestuia. De exemplu, dacă segmentul A reprezintă segmentul unitate (a se vedea Figura 38), atunci segmentul B reprezintă numărul 2, iar segmentul C reprezintă numărul 3.

Acuma, cum înmulțim noi  $3 \times 2$ ? Aplicăm transformările succesiv: pornind de la segmentul A ca segment unitate, îl alungim mai întâi de 2 ori, iar apoi încă de 3 ori (sau îl alungim mai întâi de 3 ori, iar apoi încă de 2 ori – ordinea nu contează). Rezultatul este segmentul D, a cărui lungime reprezintă numărul 6. Dar înmulțirea  $1/3 \times 1/2$ ? Luând acum segmentul D ca segment unitate, îl comprimăm mai întâi la jumătate (segmentul C), iar apoi la o treime din lungimea obținută. Rezultatul este segmentul A, care reprezintă numărul  $1/6$ .

Înmulțirea săgeților funcționează la fel (a se vedea Figura 39). Aplicăm săgeții unitate transformări succesive – doar că transformarea unei săgeți implică *două* operații: o comprimare și o rotire. Pentru a înmulți săgeata V cu săgeata W, comprimăm și rotim săgeata unitate cu cantitățile preconizate pentru V, iar apoi o comprimăm și o rotim



**Figura 38.** Putem exprima orice număr ca o transformare aplicată segmentului unitate, fie alungindu-l, fie comprimându-l. Dacă A este segmentul unitate, atunci B reprezintă numărul 2 (alungire), iar C reprezintă numărul 3 (alungire). Înmulțirea segmentelor se realizează prin transformări succesive. De exemplu, înmulțirea lui 3 cu 2 înseamnă că segmentul unitate este mai întâi alungit de 3 ori, iar apoi de încă două ori, rezultatul obținut astfel fiind o alungire de 6 ori (segmentul D). Dacă luăm pe D ca segment unitate, atunci segmentul C reprezintă numărul 1/2 (comprimare), iar segmentul B reprezintă numărul 1/3 (comprimare). Înmulțirea lui 1/2 cu 1/3 înseamnă că segmentul unitate D este comprimat la jumătate din lungimea sa, iar apoi, încă o dată, la o treime din cât era, rezultatul obținut astfel (segmentul A) reprezentând o comprimare la o șesime din lungimea inițială.



**Figura 39.** Matematicienii au descoperit că înmulțirea săgeților poate fi și ea exprimată ca o serie de transformări succesive ale unei săgeții unitate (pentru scopurile noastre, este vorba de comprimări și rotiri). La fel ca în cazul înmulțirii obișnuite, ordinea nu contează: rezultatul, săgeata X, poate fi obținută atât înmulțind săgeata V cu săgeata W, cât și înmulțind săgeata W cu săgeata V.



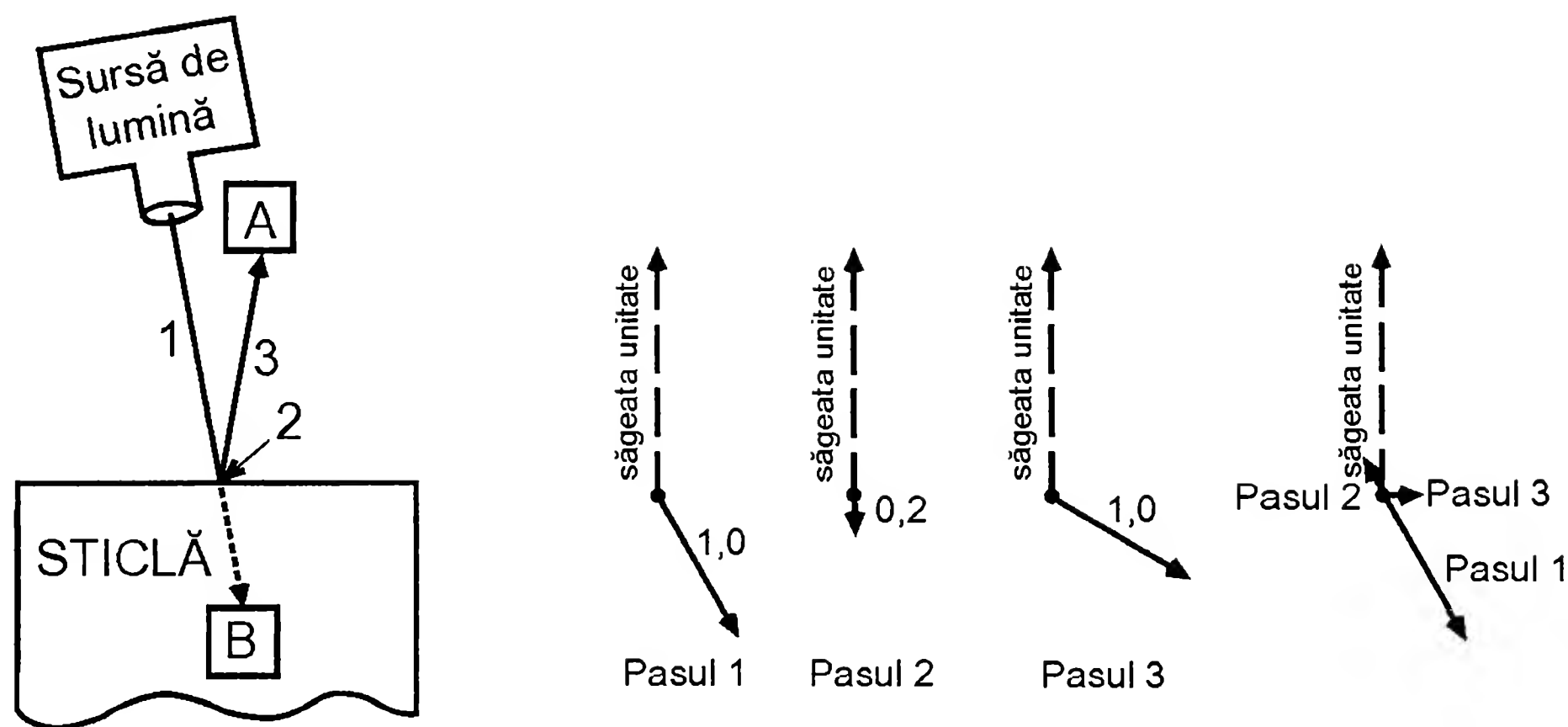
încă o dată, cu cantitățile preconizate pentru  $W$  – din nou, ordinea nu contează. Deci, înmulțirea săgeților ascultă de aceeași regulă a transformărilor succesive care se aplică și numerelor obișnuite.<sup>4</sup>

Haideți să ne întoarcem la primul experiment din prima prelegere – reflexia parțială pe o suprafață singulară – și să privim lucrurile din perspectiva ideii de pași succesivi (a se vedea Figura 40). Putem descompune drumul corespunzător reflexiei în trei pași: 1) lumina coboară de la sursă până la sticlă; 2) lumina este reflectată de sticlă; 3) lumina urcă de la sticlă la detector. Fiecare pas poate fi considerat drept un anumit factor de compresie și un anumit factor de rotație a săgeții unitate.

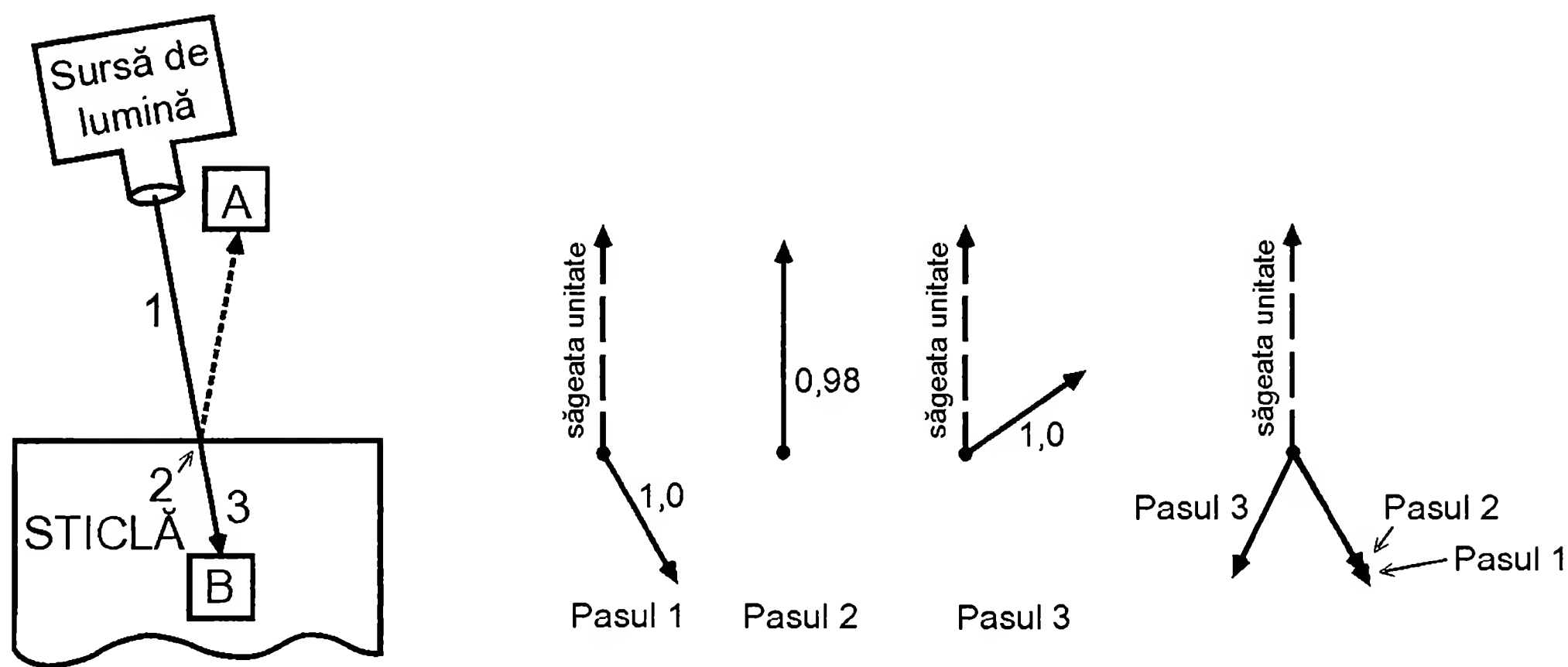
Dacă vă aduceți aminte, în prima prelegere nu am luat în considerare *toate* modurile în care lumina s-ar putea reflecta pe suprafața sticlei, lucru ce ar necesita desenarea și adunarea unei puzderii de săgetuțe. Pentru a evita toată această detaliere, am lăsat impresia că lumina coboară într-un punct anume de pe suprafața sticlei – că ea nu se împrăștie. Atunci când lumina se propagă dintr-un punct în altul, în realitate ea se împrăștie (numai dacă nu cumva este păcălită de o

---

<sup>4</sup> Matematicienii au încercat să găsească toate obiectele posibile care să asculte de regulile algebrice ( $A + B = B + A$ ,  $A \times B = B \times A$  și așa mai departe). Regulile fuseseră la origine stabilite pentru numerele întregi pozitive, cu scopul de a număra lucruri precum mere ori indivizi. Numerele au suferit îmbunătățiri prin inventarea lui zero, a fracțiilor, a numerelor iraționale – numerele ce nu pot fi exprimate ca raport de două numere întregi – și a numerelor negative. Ele au continuat să asculte de regulile inițiale ale algebrei. La început, unele din numerele inventate de matematicieni au pus probleme oamenilor – ideea de jumătate de individ era greu de conceput – dar în ziua de astăzi nu mai este nicio dificultate: nimeni nu resimte vreo reținere morală și nu este încercat de vreo indispoziție atunci când aude vorbindu-se de o medie de 3,2 indivizi pe kilometru pătrat. Dimpotrivă, lumea știe ce vrea să zică numărul 3,2: dacă se înmulțește 3,2 cu 10, se obține 32. Astfel, unele din lucrurile care satisfac regulile algebrice pot fi interesante pentru matematicieni chiar dacă ele nu reprezintă întotdeauna o situație reală. Săgețile dintr-un plan pot fi „adunate” prin așezarea lor una în continuarea celeilalte, sau pot fi „înmulțite” prin comprimări și rotiri succesive. Cum aceste săgeți ascultă de aceleași reguli ale algebrei ca și numerele obișnuite, matematicienii le numesc numere. Dar, pentru a le deosebi de numerele clasice, ei le numesc „numere complexe”. Pentru aceia dintre dumneavoastră care au studiat suficientă matematică încât să fi ajuns la numerele complexe, ar fi trebuit să spun în felul următor: „Probabilitatea unui eveniment este valoarea absolută a pătratului unui număr complex. Atunci când un eveniment se poate petrece în maniere alternative, numerele complexe se adună; atunci când el se poate întâmpla numai ca urmare a unei succesiuni de pași, numerele complexe se înmulțesc.” Chiar dacă în felul acesta lucrurile ar suna mai impresionant, nu aş afirma cu nimic mai mult decât am făcut-o anterior – pur și simplu aş folosi un alt limbaj.



**Figura 40.** Reflexia pe o suprafață singulară poate fi descompusă în trei pași, fiecare corespunzând unei comprimări și/sau unei rotiri a săgeții unitate. Rezultatul de ansamblu, o săgeată de lungime 0,2 îndreptată într-o direcție oarecare, este același de mai înainte, dar acum metoda noastră de analiză este mai detaliată.



**Figura 41.** Transmisia luminii de către o suprafață singulară poate fi de asemenea descompusă în trei pași, fiecare caracterizat de o anumită contracție și/sau o anumită rotire. O săgeată cu lungimea de 0,98 are un pătrat egal cu aproximativ 0,96, ceea ce înseamnă o probabilitate de transmisie de 96% (aceasta, dimpreună cu probabilitatea de 4% pentru reflexie, dau socoteală în proporție de 100% de comportarea luminii).



lentilă) și asociat acestui lucru se înregistrează o anumită contracție a săgeții unitate. Totuși, pentru moment aș dori să rămânem la perspectiva simplificată în care lumina nu se împrășteie, și ca atare se cuvine să neglijăm comprimarea respectivă. De asemenea, din moment ce lumina nu se împrășteie, este adecvat să presupunem că orice foton care părăsește sursa, ajunge fie în A, fie în B.

Așadar, în cadrul primului pas nu avem contracție, dar există o rotire – ea corespunde cantității cu care se rotește acul cronometrului imaginar ce măsoară timpul necesar fotonului să se deplaseze de la sursă la suprafața superioară a sticlei. În exemplul de față, săgeata corespunzătoare primului pas sfârșește prin a rămâne cu lungimea 1, și orientată într-o direcție oarecare – să zicem, înspre ora 5.

Al doilea pas îl constituie reflectarea fotonului de către sticlă. Aici, avem o comprimare sesizabilă – de la 1 la 0,2 – și o rotire cu o jumătate de tură. (Aceste valori par acum arbitrare: ele depind de materialul sticlos ori de altă natură, pe care se reflectă lumina. În cea de-a treia prelegere vă voi explica acest lucru!) Deci, pasul doi este caracterizat de o amplitudine cu lungimea 0,2, și de o direcționare înspre ora 6 (jumătate de rotație).

Ultimul pas este reprezentat de deplasarea fotonului de la suprafața de sticlă până sus la detector. Aici, ca și în cazul primului pas, nu avem contracție, dar există o rotire – haideți să zicem că distanța corespunzătoare este ceva mai mică, și că săgeata se orientează înspre ora 4.

Acum să „înmulțim” pe rând cele trei săgeți (adunăm unghiurile și înmulțim lungimile). Efectul de ansamblu al pașilor 1, 2 și 3 – 1) o rotire; 2) o contracție și o rotire cu jumătate de tură; 3) din nou o rotire – este același cu cel din prima prelegere. Rotirea corespunzătoare pașilor 1 și 3 (ora 5 + ora 4) este aceeași ca valoare cu cea pe care am obținut-o atunci când am lăsat cronometrul să meargă pe parcursul întregii distanțe (ora 9). Jumătatea de tură suplimentară face ca săgeata să arate în sens opus acului cronometrului, exact așa cum se întâmpla în prima prelegere, iar contracția în proporție de 0,2 de la cel de-al doilea pas, conduce la o săgeată al cărei pătrat ne dă procentul de 4% reflexie parțială găsit pentru cazul unei suprafețe singulare.

În cadrul acestui experiment, există o chestiune pe care nu am abordat-o în prima prelegere: cum stau lucrurile cu fotonii care ajung în B – cei care sunt transmiși de suprafața de sticlă? Amplitudinea pentru un foton care ajunge în B trebuie să aibă o lungime în jurul a 0,98, căci  $0,98 \times 0,98 = 0,9604$ , aproape de 96%. Și aceasta poate fi analizată prin descompunere în mai mulți pași (a se vedea Figura 41).

Primul pas este același ca în cazul drumului până în A – fotonul coboară de la sursa de lumină la suprafața sticlei – și săgeata unitate se rotește către ora 5.

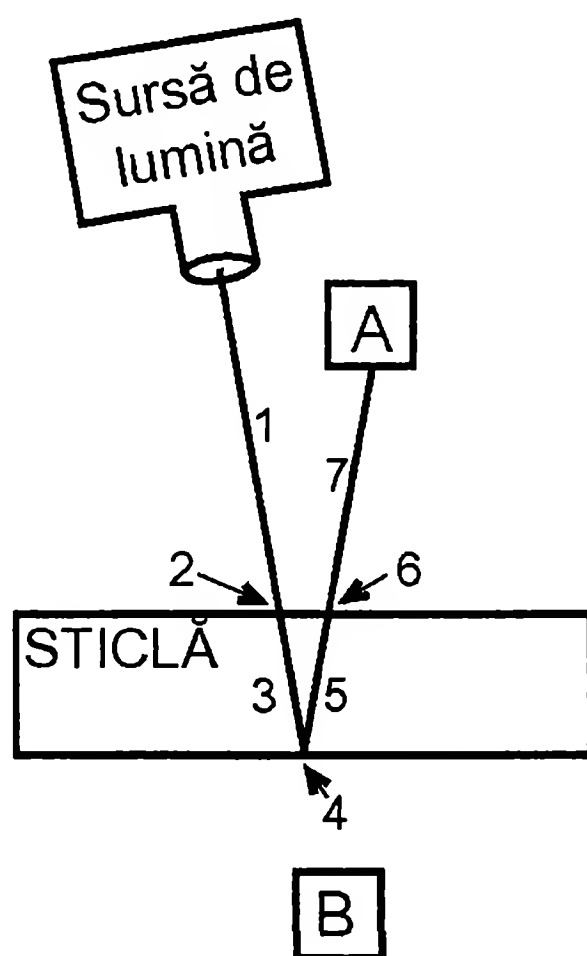
Al doilea pas îl constituie trecerea fotonului prin suprafața sticlei: la transmisie nu avem rotire, ci doar o ușoară contracție – până la 0,98.

Al treilea pas – mersul fotonului în interiorul sticlei – implică o rotire adițională, fără contracție.

Rezultatul net este o săgeată de lungime 0,98, orientată într-o direcție oarecare, pătratul ei reprezentând probabilitatea ca fotonul să ajungă în punctul B – 96%.

Haideți acum să mai urmărim o dată reflexia parțială pe două suprafețe. Reflexia pe fața superioară este aceeași ca pentru o suprafață singulară, deci cei trei pași corespunzători sunt aceiași pe care i-am discutat un pic mai devreme (a se vedea Figura 40).

Reflexia pe fața inferioară poate fi descompusă în șapte pași (a se vedea Figura 42). Ea implică o rotire cu o cantitate egală cu cea cu care se rotește acul cronometrului atunci când măsoară timpul



**Figura 42.** Reflexia pe fața inferioară a unei lame de sticlă poate fi descompusă în șapte pași. Pașii 1, 3, 5 și 7 implică doar rotiri; pașii 2 și 6 implică fiecare câte o contracție în proporție de 0,98; iar pasul 4 implică o contracție în proporție de 0,2. Rezultatul îl constituie o săgeată cu lungimea 0,192 – valoare care în prima prelegere a fost aproximată cu 0,2 – rotită cu un unghi echivalent cantității totale cu care s-a rotit acul cronometrului imaginar.

necesar fotonului pentru a parcurge întreaga distanță (pașii 1, 3, 5 și 7), o contracție în proporție de 0,2 (pasul 4) și două contracții în proporție de 0,98 (pașii 2 și 6). Săgeata rezultantă sfârșește în aceeași direcție ca mai înainte, iar lungimea ei este circa 0,192 ( $0,98 \times 0,2 \times 0,98$ ), valoare pe care în prima prelegere am aproximat-o cu 0,2.

În concluzie, iată regulile reflexiei și transmisiei luminii de către sticlă: 1) reflexia din aer înapoi în aer (pe fața superioară) implică o contracție în proporție de 0,2 și o rotire cu jumătate de tură; 2) reflexia din sticlă înapoi în sticlă (pe fața inferioară) implică tot o contracție în proporție de 0,2, dar fără rotire; 3) transmisia din aer în sticlă, sau din sticlă în aer, implică în ambele cazuri doar o contracție în proporție de 0,98, fără rotire.

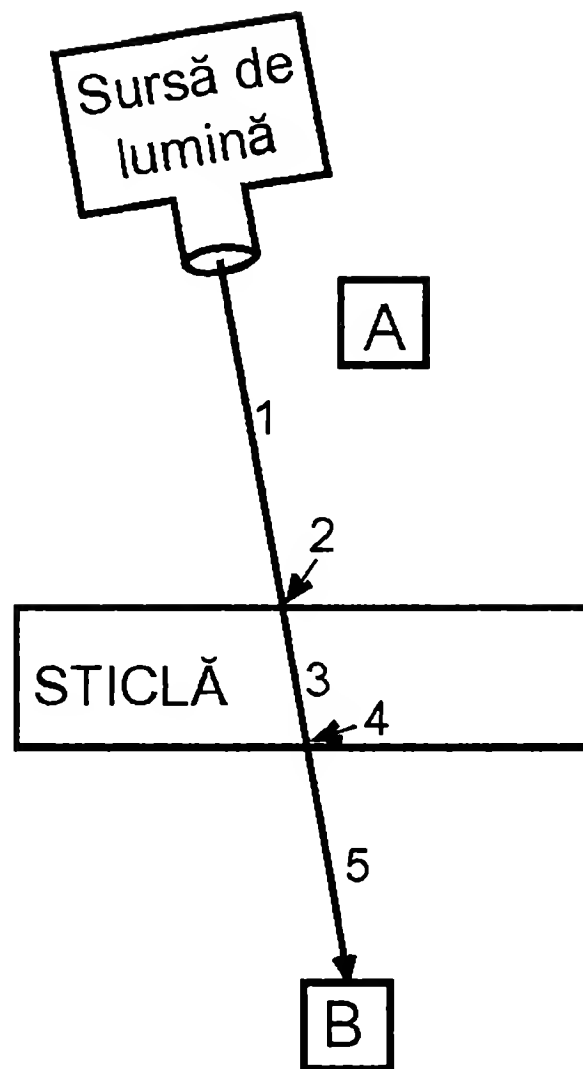
Poate că nu este cazul să insist mai mult de atât, dar nu pot să nu vă prezint încă un exemplu drăguț de cum stau lucrurile și de cum sunt ele analizate prin intermediul acestor reguli a pașilor succesivi. Haideți să mutăm detectorul într-un punct de sub sticlă și să considerăm ceva despre care nu am pomenit în prima prelegere – probabilitatea de transmisie prin două suprafețe de sticlă.

Desigur, cunoașteți răspunsul: pur și simplu, probabilitatea ca un foton să ajungă în B este egală cu 100% minus probabilitatea ca el să ajungă în A, pe care am determinat-o în prealabil. Astfel, dacă am găsit că șansa ca fotonul să ajungă în A este de 7%, atunci șansa ca el să ajungă în B trebuie să fie 93%. Și, pe măsură ce probabilitatea de ajungere în A variază de la zero la 8%, și mai departe până la 16%, (în funcție de diferitele grosimi ale sticlei), probabilitatea de ajungere în B se modifică de la 100% la 92% și până la 84%.

Acesta este răspunsul corect, însă noi ne așteptăm să putem calcula *toate* probabilitățile prin ridicarea la pătrat a unor săgeți finale. Cum calculăm săgeata amplitudinii corespunzătoare transmisiei printr-o lamă de sticlă? Cum face aceasta să varieze atât de potrivit ca lungime, încât să se coreleze în toate situațiile cu probabilitatea ajungerii în A, pentru ca suma lor să dea mereu exact 100%? Haideți să privim lucrurile mai în detaliu (a se vedea Figura 43).

Ajungerea unui foton de la sursă la detectorul din punctul B, sub stratul de sticlă, implică cinci pași. Să comprimăm și să rotim săgeata unitate, pe măsura parcurgerii acestora.

Primii trei pași sunt aceiași ca în exemplul anterior: fotonul se deplasează de la sursă la sticlă (rotire. fără contracție); fotonul este transmis de suprafața superioară (contracție în proporție de 0,98, fără rotire); fotonul se deplasează prin sticlă (rotire fără contracție).



**Figura 43.** Transmisia prin două suprafețe de sticlă poate fi descompusă în 5 pași. Pasul 2 comprimă săgeata unitate până la 0,98, pasul 4 o mai comprimă o dată până la 0,98 din cât era (aproximativ până la 0,96), iar pașii 1, 3 și 5 implică doar rotiri. Săgeata rezultantă, de lungime 0,96, are pătratul egal cu aproximativ 0,92, ceea ce reprezintă o probabilitate de transmisie prin cele două suprafețe de 92% (aceasta corespunde aceluși 8% așteptat pentru reflexie, corect doar „de două ori pe zi”). Atunci când grosimea lamei de sticlă este potrivită pentru a produce o probabilitate de reflexie de 16%, aceasta, dimpreună cu probabilitatea de transmisie de 92%, dau socoteală pentru un procent de lumină de 108%! Ceva nu este în regulă cu această analiză!

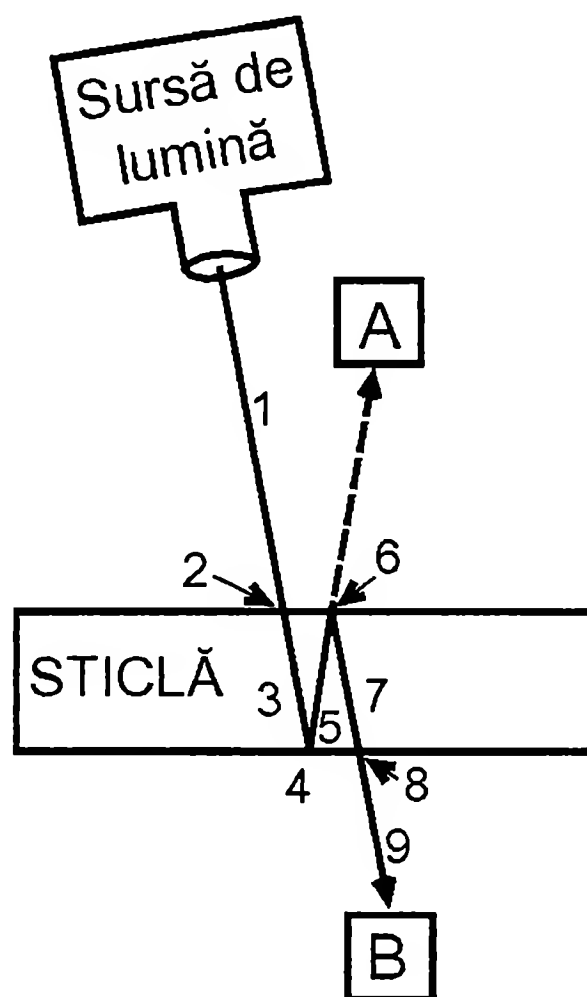
Al patrulea pas – fotonul traversează suprafața inferioară – este identic cu pasul 2 în ceea ce privește rotirea și comprimarea: nu avem rotire, dar avem o contracție în proporție de 0,98 din deja existentul 0,98, deci săgeata are o lungime de aproximativ 0,96.

În fine, fotonul se deplasează din nou prin aer, coborând până la detector – aceasta înseamnă o rotire suplimentară, fără vreo altă comprimare. Rezultatul este o săgeată de lungime 0,96, orientată într-o direcție oarecare, determinată de rotirile succesive ale acului cronometrului.

O săgeată a cărei lungime este 0,96, reprezintă o probabilitate de aproximativ 92% (0,96 ridicat la pătrat), ceea ce înseamnă că din fie-

care 100 de fotoni ce părăsesc sursa, în punctul B ajung în medie 92. Aceasta înseamnă, de asemenea, că 8% din fotoni sunt reflectați de cele două suprafețe și ajung în A. Însă, în prima prelegere, noi am descoperit că reflexia de 8% pentru două suprafețe de sticlă este corectă doar uneori („de două ori pe zi”) – am descoperit că, în realitate, reflexia pe două suprafețe fluctuează într-un ciclu de la zero la 16%, pe măsură ce grosimea stratului de sticlă tot crește. Ce se întâmplă atunci când sticla are exact grosimea potrivită pentru a produce o reflexie parțială de 16%? Pentru fiecare 100 de fotoni ce părăsesc sursa, 16 ajung în punctul A și 92 ajung în punctul B, ceea ce înseamnă că am dat socoteală de 108% din lumină – oribil! Ceva este în neregulă.

Am uitat să considerăm *toate* căile pe care lumina ar putea ajunge în B! De pildă, ea ar putea să ricoșeze de fața inferioară și să o ia în sus prin sticlă, ca și când s-ar îndrepta înspre punctul A, dar să se reflecte pe suprafața superioară și să coboare înapoi în B (a se vedea Figura 44). Acest drum necesită nouă pași. Haideți să vedem ce se întâmplă pe rând cu săgeata unitate, pentru fiecare pas făcut de lumină (nu vă îngrijorați, ea nu face decât să se contracte și să se rotească!).



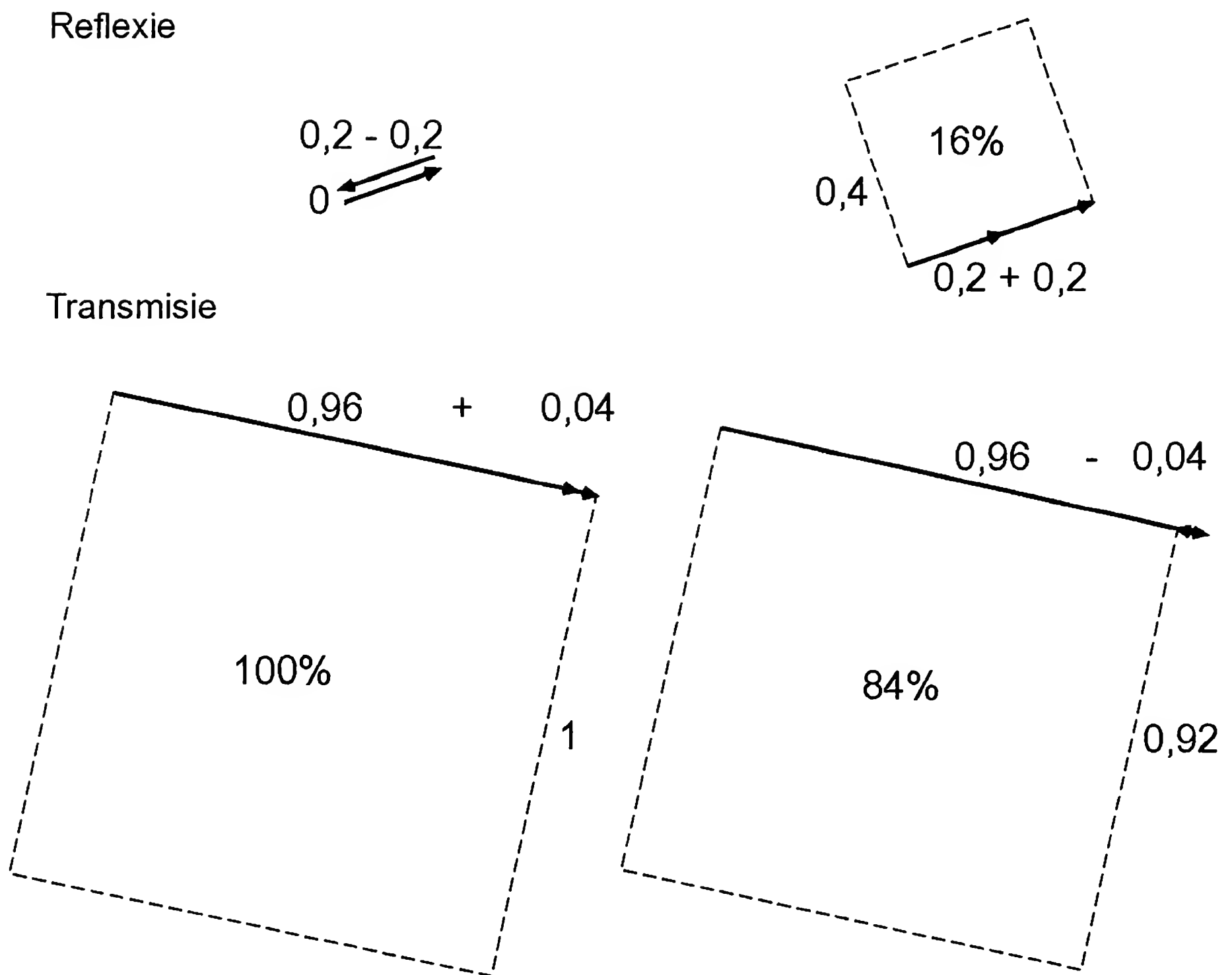
**Figura 44.** Pentru a face calculele mai precise, trebuie considerat și un alt mod în care lumina ar putea fi transmisă de cele două suprafețe. Acest drum implică două contracții în proporție de 0,98 (pașii 2 și 8) și două în proporție de 0,2 (pașii 4 și 6), rezultând astfel o săgeată de lungime 0,0384 (rotunjită la valoarea 0,04).

La pasul 1 – fotonul coboară prin aer – avem rotire, fără contracție. La pasul 2 – fotonul intră în sticlă – avem contracție în proporție de 0,98, fără rotire. La pasul 3 – fotonul coboară prin sticlă – avem rotire, fără contracție. La pasul 4 – reflexia pe fața inferioară – avem contracție în proporție de 0,2 din 0,98, adică până la 0,196, fără rotire. La pasul 5 – fotonul urcă prin sticlă – avem rotire, fără contracție. La pasul 6 – fotonul ricoșează de fața superioară (de fapt, ea este o față „inferioară“, căci fotonul rămâne *în* sticlă) – avem contracție în proporție de 0,2 din 0,196, adică până la 0,0392, fără rotire. La pasul 7 – fotonul coboară încă o dată prin sticlă – avem rotire, fără contracție. La pasul 8 – fotonul traversează fața inferioară – avem contracție în proporție de 0,98 din 0,0392, adică până la 0,0384, fără rotire. În fine, la pasul 9 – fotonul ajunge la detector, prin aer – avem rotire, fără contracție.

Rezultatul tuturor acestor contracții și rotiri îl constituie o amplitudine de lungime 0,0384 – practic, o să o luăm egală cu 0,04 – și rotită cu un unghi corespunzător valorii totale cu care se rotește acul cronometrului atunci când măsoară timpul necesar fotonului pentru parcurgerea acestui drum mai lung. Această săgeată constituie o *a doua* manieră în care lumina poate ajunge de la sursă la B. Acum avem două căi alternative, deci cele două săgeți – săgeata de lungime 0,96, corespunzătoare drumului mai direct, și săgeata de lungime 0,4, corespunzătoare drumului ceva mai lung – trebuie *adunate* pentru a obține săgeata finală.

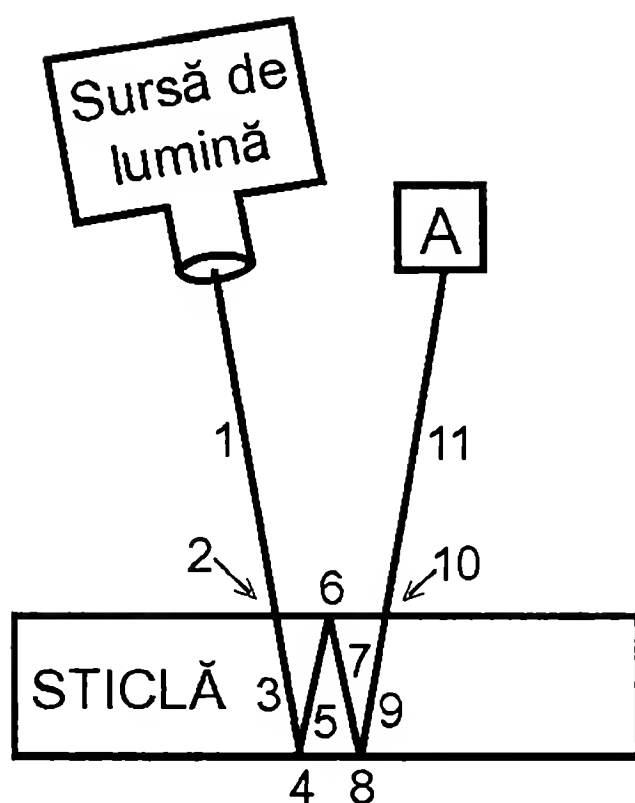
În general, cele două săgeți nu sunt orientate în aceeași direcție, din cauză că varierea grosimii sticlei modifică unghiul dintre săgeata de lungime 0,04 și cea de lungime 0,96. Dar fiți atenți cât de bine se potrivesc lucrurile: rotirea suplimentară a acului cronometrului corespunzătoare pașilor 3 și 5 (în cazul în care fotonul ar sfârși în punctul A) este egală cu rotirea suplimentară corespunzătoare pașilor 5 și 7 (atunci când fotonul ajunge în B). Aceasta înseamnă că, atunci când cele două săgeți de la reflexie se anulează reciproc, dând reflexie zero, cele două săgeți de la transmisie se întrajutorează, dând o săgeată finală de lungime  $0,96 + 0,04$ , adică 1. Atunci când probabilitatea de reflexie este zero, probabilitatea de transmisie este 100% (a se vedea Figura 45). Iar atunci când cele două săgeți de la reflexie se întrajutorează pentru a produce o amplitudine egală cu 0,4, cele două săgeți de la transmisie se contracarează, producând o amplitudine de lungime  $0,96 - 0,04$ , adică 0,92; atunci când calculele pentru reflexie dau 16%, rezultatul pentru transmisie este de 84% (0,92 ridicat la pătrat). Vedeți cât este de isteată Natura să se asigure că regulile dau socoteală totdeauna de 100% din fotoni?<sup>5</sup>





**Figura 45.** Natura se asigură că de fiecare dată dă socoteală de 100% din lumină. Atunci când grosimea lamei de sticlă are o astfel de valoare încât săgețile de la transmisie să se sporească reciproc, cele de la reflexie se opun una alteia; atunci când săgețile de la reflexie conlucrează, cele de la transmisie se contracarează.

<sup>5</sup> Veți fi băgat de seamă că, pentru a da socoteală de 100% din lumină, am aproximat pe 0,0384 cu 0,04 și am zis că pătratul lui 0,92 este egal cu 84%. Însă atunci când adunăm *toate* variantele, nu mai trebuie să îi rotunjim pe 0,0384 și pe 84% - toate frânturile de săgetuțe (reprezentând toate felurile în care lumina se poate propaga) se compensează între ele și mențin corectitudinea rezultatului. Pentru aceia dintre dumneavoastră cărora le plac astfel de lucruri, iată un alt exemplu de cale pe care lumina ar putea ajunge de la sursă la detectorul din punctul A: o serie de trei reflexii (plus două transmisii), rezultând într-o săgeată finală de lungime  $0,98 \times 0,2 \times 0,2 \times 0,2 \times 0,98$ , sau aproximativ 0,008 - o săgeată foarte micuță (a se vedea Figura 46). Pentru a efectua calculul complet în privința reflexiei pe o lamă, ar trebui adunată și această infimă săgeată, precum și una încă și mai minusculă, corespunzătoare la cinci reflexii, și așa mai departe.

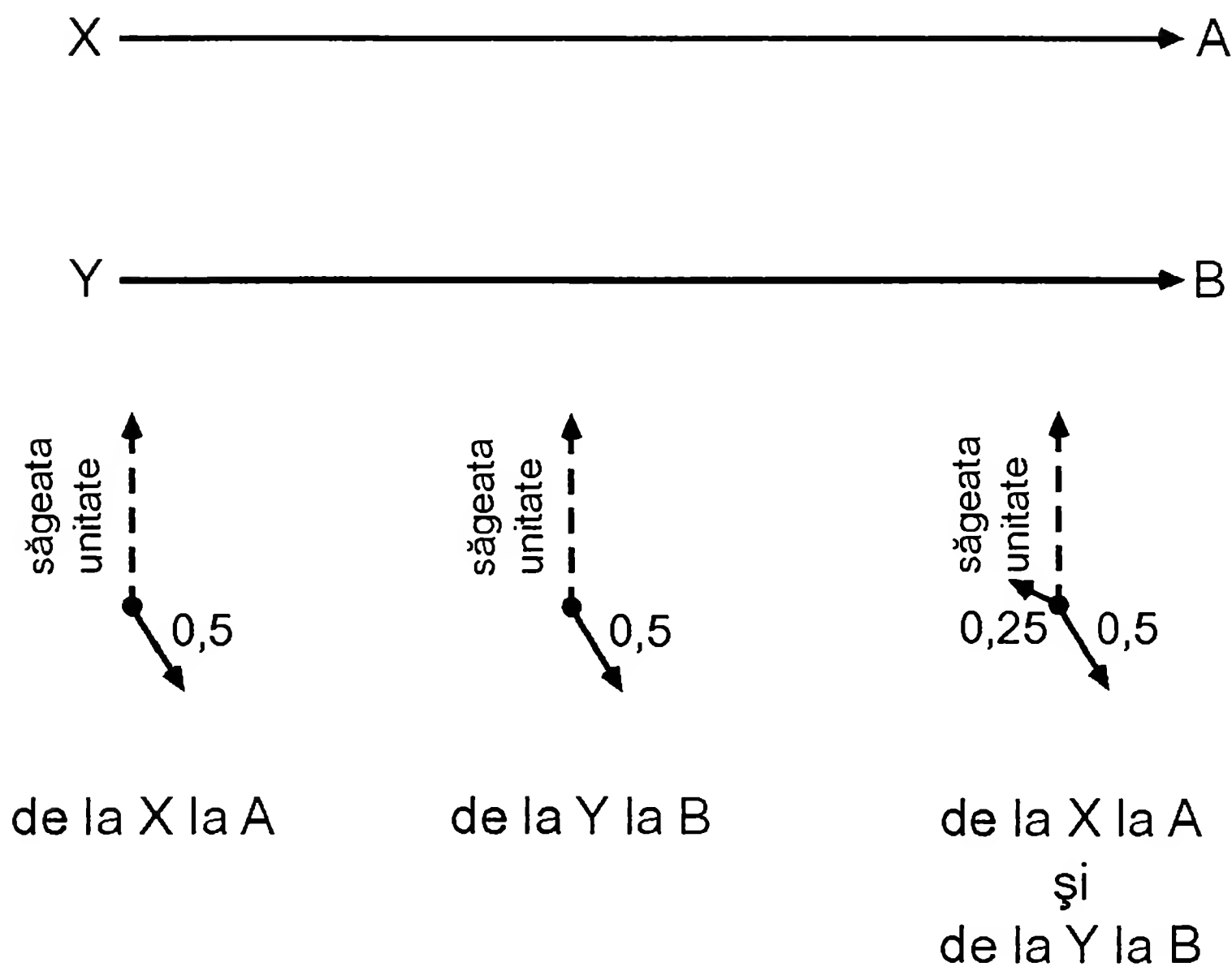


**Figura 46.** Pentru un calcul și mai precis, ar trebui luate în considerare încă alte moduri în care lumina se poate reflecta pe o lamă de sticlă. În figura de față avem contracții în proporție de 0,98 în cadrul pașilor 2 și 10, și contracții în proporție de 0,2 în cadrul pașilor 4, 6, și 8. Rezultatul este o săgeată cu lungimea aproximativ 0,008, ce reprezintă o altă alternativă pentru reflexie, și care, în consecință, ar trebui adunată cu celelalte două (cea de lungime 0,2, corespunzătoare feței superioare, și cea de lungime 0,192, corespunzătoare feței inferioare).

În fine, mai înainte de a pune capăt prelegerii, aș dori să vă spun că există o extindere a regulii ce descrie situațiile în care se înmulțesc săgețile: săgețile trebuie înmulțite nu numai în cazul unui eveniment care constă dintr-o succesiune de pași, ci și în cazul unui eveniment care constă într-un număr de lucruri ce se petrec concomitent – independent, și posibil simultan. De exemplu, să presupunem că avem două surse, X și Y, și două detectoare, A și B (a se vedea Figura 47), și că vrem să calculăm probabilitatea următorului eveniment: după ce X și Y vor fi emis fiecare câte un foton, în A și în B se înregistrează câte un foton.

În acest exemplu, fotonii ajung la detector deplasându-se în spațiu – ei nu sunt nici reflectați și nici transmiși – deci acum ar fi momentul potrivit să nu mai neglijez faptul că lumina se împrășteie pe măsură ce se propagă. Vă prezint acum *regula completă* pentru lumina monocromatică ce se propagă între două puncte din spațiu – nu avem aici nicio aproximație și nicio simplificare. Iată tot ce trebuie de știut în legătură cu propagarea luminii (exceptând fenomenul de polarizare): *unghiul* săgeții depinde de acul cronometrului imaginar, care se rotește





**Figura 47.** În cazul în care unul din felurile în care se poate petrece un anumit eveniment depinde de un număr de lucruri ce se pot întâmpla în mod independent, amplitudinea corespunzătoare acelei maniere se calculează înmulțind săgețile caracteristice acelor lucruri independente. În cazul nostru, evenimentul final este: după ce sursele X și Y emit fiecare câte un foton, fotomultiplicatorii din punctele A și B produc fiecare câte un clic. Unul din felurile în care s-ar putea petrece acest eveniment, este ca un foton să ajungă din X în A, iar celălalt să ajungă din Y în B (două lucruri independente). Pentru a calcula probabilitatea acestei „prime maniere“, se înmulțesc săgețile corespunzătoare fiecărui lucru independent – fotonul din X în A, respectiv fotonul din Y în B – obținându-se astfel săgeata pentru această modalitate particulară. (Analiza se continuă în Figura 48.)

de un anumit număr de ori pentru fiecare centimetru parcurs (în funcție de culoarea fotonului); *lungimea* săgeții este invers proporțională cu distanța parcursă de lumină – cu alte cuvinte, săgeata se contractă pe măsură ce lumina merge mai departe.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Această regulă este în concordanță cu ceea ce se predă la școală – faptul că valoarea luminii transmise la o anumită distanță variază invers proporțional cu pătratul distanței – deoarece o săgeată ce se comprimă până la jumătate din lungimea ei inițială, va avea pătratul egal cu un sfert din cât era la început.

Haideți să presupunem că săgeata corespunzătoare drumului de la X la A are lungimea 0,5 și este orientată la ora 5, și că la fel stau lucrurile și pentru săgeata corespunzătoare drumului de la Y la B (a se vedea Figura 47). Înmulțind cele două săgeți, obținem o săgeată finală de lungime 0,25, orientată la ora 10.

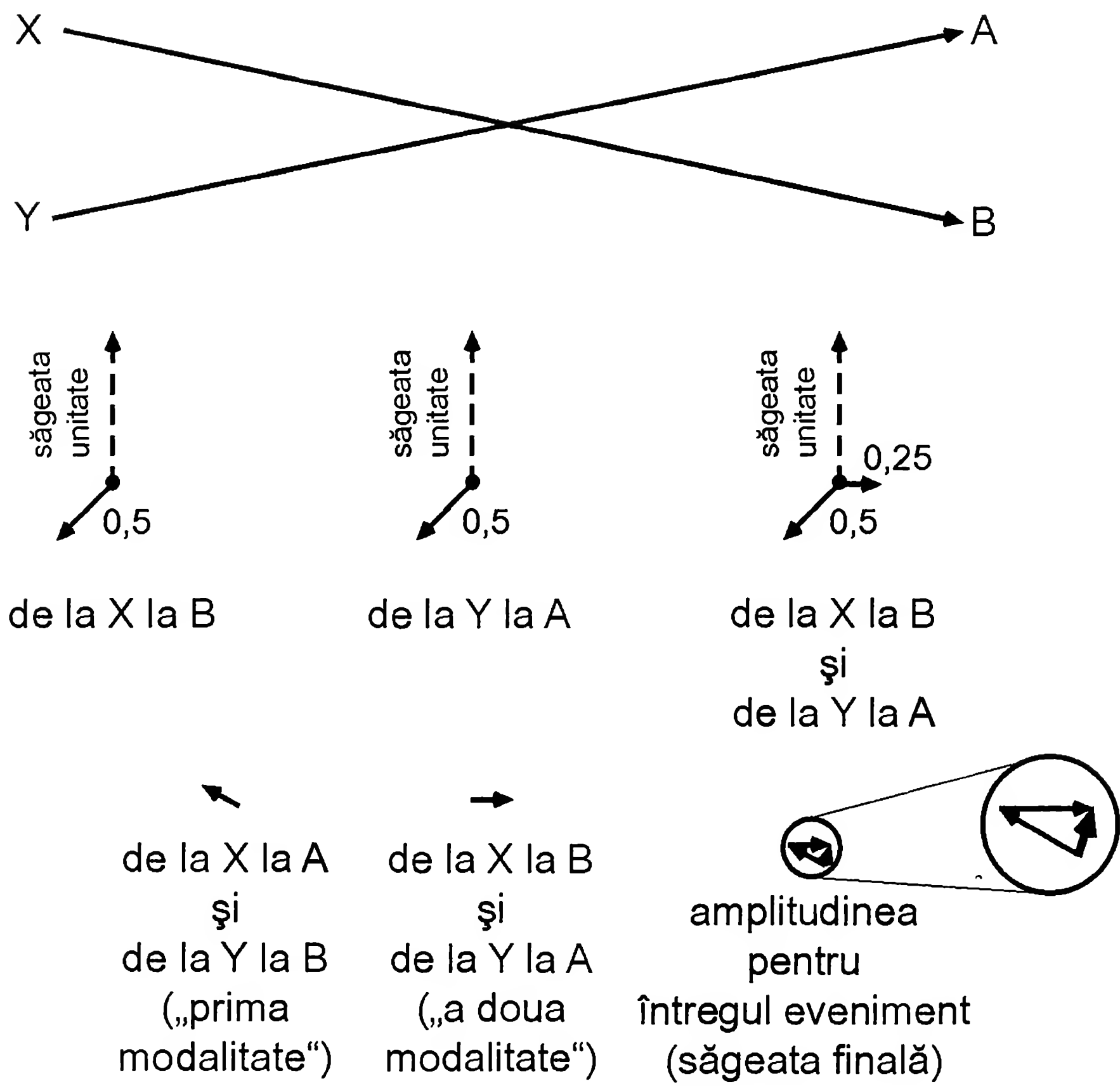
Dar stați! Mai există un mod în care s-ar putea petrece acest eveniment: fotonul din X ar putea ajunge în B, iar fotonul din Y ar putea ajunge în A. Fiecare din aceste subevenimente are la rândul său o anumită amplitudine, iar aceste săgeți trebuie și ele desenate și înmulțite, pentru a obține amplitudinea acestui fel anume de producere a evenimentului (a se vedea Figura 48). Cum valoarea contracției variază cu distanța mult mai slab decât rotirea, cele două săgeți au în esență aceeași lungime ca și celelalte, 0,5, însă orientarea lor este complet diferită: acul cronometrului se rotește de 14.000 de ori pentru fiecare centimetru parcurs de lumina roșie, deci chiar și o diferență infimă între distanțe, conduce la o diferență substanțială de cronometrare.

Pentru a obține săgeata finală, se adună amplitudinile corespunzătoare fiecărui mod în care s-ar putea realiza evenimentul. Din moment ce lungimile lor sunt în esență egale, este posibil ca săgețile să se anuleze reciproc, în cazul în care orientările lor sunt opuse. Unghiul dintre săgețile corespunzătoare celor două maniere de producere a evenimentului poate fi modificat prin schimbarea distanței dintre surse sau dintre detectoare: exact ca și în cazul reflexiei parțiale pe două suprafețe, simpla apropiere sau depărtare foarte mică a celor două detectoare unul de altul, poate face ca probabilitatea evenimentului să se amplifice sau să se anuleze cu totul.<sup>7</sup>

În acest exemplu, înmulțim și apoi adunăm niște săgeți, cu scopul de a obține o săgeată finală (amplitudinea unui eveniment) al cărei pătrat reprezintă probabilitatea evenimentului. Trebuie subliniat faptul că, indiferent cât de multe săgeți am desena, am aduna, sau am înmulți, țelul nostru este să calculăm o *unică săgeată finală corespunzătoare evenimentului*. La început, studenții de la fizică fac adesea greșeala de a scăpa din vedere acest aspect important. Ei petrec atât de mult timp analizând evenimente ce implică câte un singur foton, încât ajung să își închipuie că săgeata este cumva asociată fotonului. Însă aceste săgeți reprezintă amplitudini de probabilitate și, ridicate la pătrat, ele dau *probabilitatea* unui eveniment complet.<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> Acest fenomen, numit efectul Hanbury-Brown-Twiss, a fost utilizat pentru a decela sursele de unde radio singulare de cele duble din spațiul îndepărtat, chiar și atunci când sursele duble sunt extrem de apropiate.



**Figura 48.** Celălalt fel în care s-ar putea petrece evenimentul descris în Figura 47 – fotonul din X să ajungă în B și fotonul din Y să ajungă în A – depinde de asemenea de producerea a două lucruri independente, deci amplitudinea pentru această „a doua manieră” se calculează tot prin înmulțirea săgeților corespunzătoare acelor fapte. Săgețile obținute pentru „prima modalitate” și „a doua modalitate” se adună în cele din urmă, rezultând săgeata finală corespunzătoare evenimentului. Probabilitatea unui eveniment este totdeauna reprezentată de o *unică săgeată finală* – indiferent de cât de multe săgeți au fost desenate, înmulțite și adunate pe parcurs, pentru a se ajunge la aceasta.

<sup>8</sup> Nescăpând din vedere acest principiu, studenții vor evita să fie derutați de lucruri precum „reducerea unui pachet de unde” și alte asemenea magii.

În prelegerea următoare, voi începe procesul de simplificare și de explicare a proprietăților materiei – explicarea mecanismului din care provine contracția în proporție de 0,2, a motivului pentru care lumina pare că se propagă mai încet prin apă sau prin sticlă decât prin aer, și așa mai departe – căci, până aici, eu am trișat: fotonii nu ricoșează de suprafața sticlei, ci interacționează cu electronii din *interiorul* acesteia. Vă voi prezenta felul în care fotonii nu fac decât să se deplaseze de la un electron la altul, și modul în care reflexia și transmisia reprezintă de fapt rezultatul captării unui foton de către un electron, al „scărpinării în creștetul capului“, ca să zicem așa, pe care o execută electronul, și al emiterii de către acesta a unui nou foton. Această simplificare a tot ceea ce am discutat până acum este foarte simpatică.

# 3

## ELECTRONII ȘI INTERACȚIUNILE LOR

Aceasta este a treia dintr-o serie de patru prelegeri referitoare la un subiect cât se poate de dificil – teoria electrodinamicii cuantice – și cum în această seară, în mod vizibil, este prezentă mai multă lume decât în celelalte dăți, înseamnă că unii dintre dumneavoastră nu ați urmărit primele două prelegeri, și că cea de acum vi se va părea de neînțeles. Celor care *ați asistat* la celelalte două prelegeri, ea vi se va părea și dumneavoastră de neînțeles, doar că dumneavoastră veți fi știind că nu este nimic grav: așa cum am explicat în prima prelegere, maniera în care suntem obligați să descriem Natura este în general incomprehensibilă.

Menirea acestor prelegeri este de a vă prezenta partea din fizică pe care o cunoaștem cel mai bine, și anume interacțiunea luminii cu electronii. Majoritatea fenomenelor ce vă sunt familiare implică această interacțiune – de pildă, întreaga chimie și biologie. Singurele fenomene care nu sunt acoperite de această teorie sunt cele gravitaționale și cele nucleare; toate celelalte sunt conținute în cadrul acestei teorii.

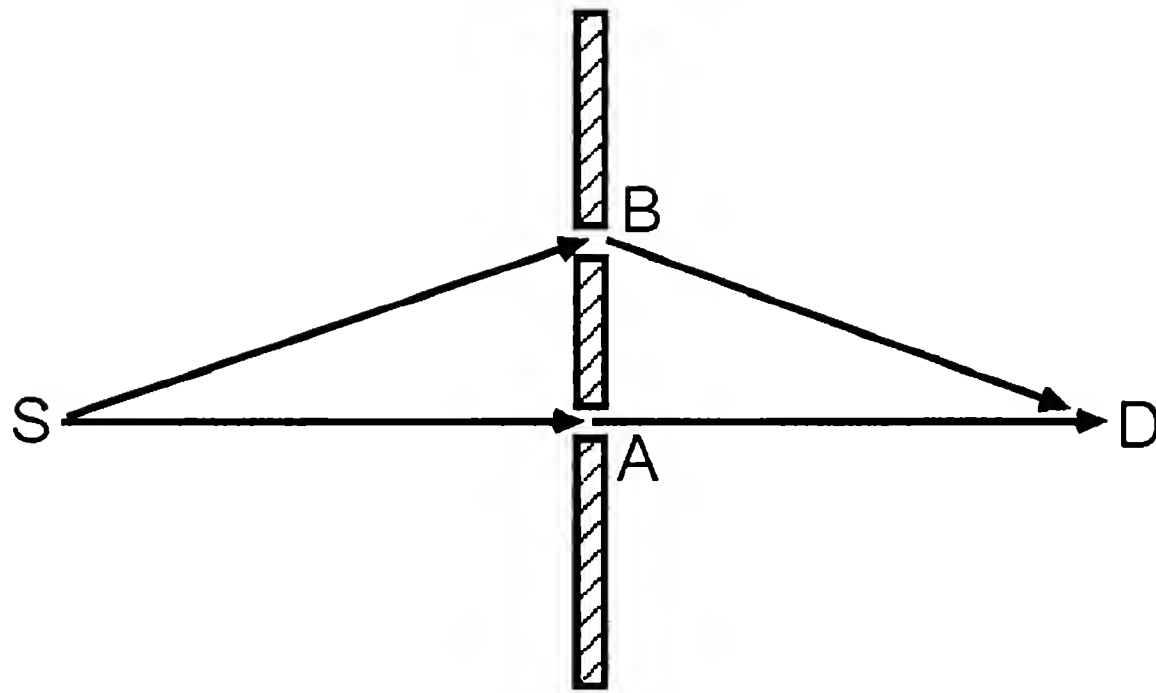
În prima prelegere am aflat că nu dispunem de un mecanism satisfăcător care să descrie nici chiar fenomene cele mai simple, precum reflexia parțială a luminii pe sticlă. De asemenea, nu avem cum să prezicem dacă un foton anume va fi reflectat ori transmis de sticlă. Tot ceea ce putem face este să calculăm *probabilitatea* ca un anume eveniment să se întâmple – în cazul nostru, ca lumina să fie reflectată. (Atunci când lumina cade drept în jos pe o suprafață singulară de sticlă, această probabilitate este de aproximativ 4%; ea crește pe măsură ce lumina cade pe suprafața de sticlă din ce în ce mai razant.)

În situațiile obișnuite în care avem de-a face cu probabilități, există următoarele „reguli de compunere” a lor: 1) dacă ceva se poate întâmpla în *maniere alternative*, atunci probabilitatea corespunzătoare fiecărui mod în parte *se adună*; 2) dacă evenimentul se petrece ca o *sucesiune de pași* – sau dacă depinde de un număr de lucruri ce se petrec „concomitent” (independent) – atunci probabilitățile corespunzătoare fiecărui pas (sau fiecărui lucru) în parte *se înmulțesc*.

În lumea sălbatică și minunată a fizicii cuantice, probabilitățile se calculează ca *pătratul lungimii unei săgeți*: acolo unde, în situații obișnuite, ne-am aștepta să adunăm probabilități, vom „aduna” *săgeți*; acolo unde, în mod normal, ne-am aștepta să înmulțim probabilități, vom „înmulți” *săgeți*. Rezultatele particulare pe care le obținem calculând probabilitățile în această manieră se potrivesc perfect cu rezultatele experimentale. Eu sunt cât se poate de încântat de faptul că trebuie să recurgem la astfel de reguli ciudate și raționamente stranii pentru a înțelege Natura, și îmi face plăcere să le vorbesc oamenilor despre ele. În spatele acestei analizări a Naturii nu se află niciun fel de „roțițe și angrenaje”; dacă doriți să înțelegeți Natura, trebuie să luați aceste lucruri exact așa cum sunt.

Mai înainte de a intra propriu-zis în miezul problemei, aș dori să vă mai prezint un exemplu de mod în care se comportă lumina. Mă voi referi la lumina foarte slabă de o singură culoare – câte un foton o dată – care se propagă de la sursa din S până la detectorul D (a se vedea Figura 49). Haideți să așezăm un paravan între sursă și detector, și să practicăm în el două orificii minuscule, A și B, la câțiva milimetri distanță unul de altul. (Dacă detectorul se află la un metru depărtare de sursă, atunci orificiile trebuie să aibă mai puțin de o zecime de milimetru deschidere.) Haideți să plasăm orificiul A în linie cu S și D, iar pe B un pic în lateral, necolinar.

Atunci când astupăm orificiul din B, obținem în D un anumit număr de clicuri – ceea ce reprezintă fotonii care trec prin A (haideți să zicem că, în medie, detectorul clicăie o dată la 100 de fotoni plecați din S, sau 1%). Atunci când astupăm orificiul din A și îl deschidem pe cel din B, știm, din cea de-a doua prelegere, că obținem în medie aproape același număr de clicuri, pentru că orificiile sunt atât de mici. (Dacă „gâtuim” lumina prea mult, regulile din lumea obișnuită – cum ar fi cea că lumina se propagă în linie dreaptă – se prăbușesc.) Atunci când deschidem ambele orificii, obținem un rezultat complicat, deoarece se manifestă interferența: dacă cele două orificii se află la o



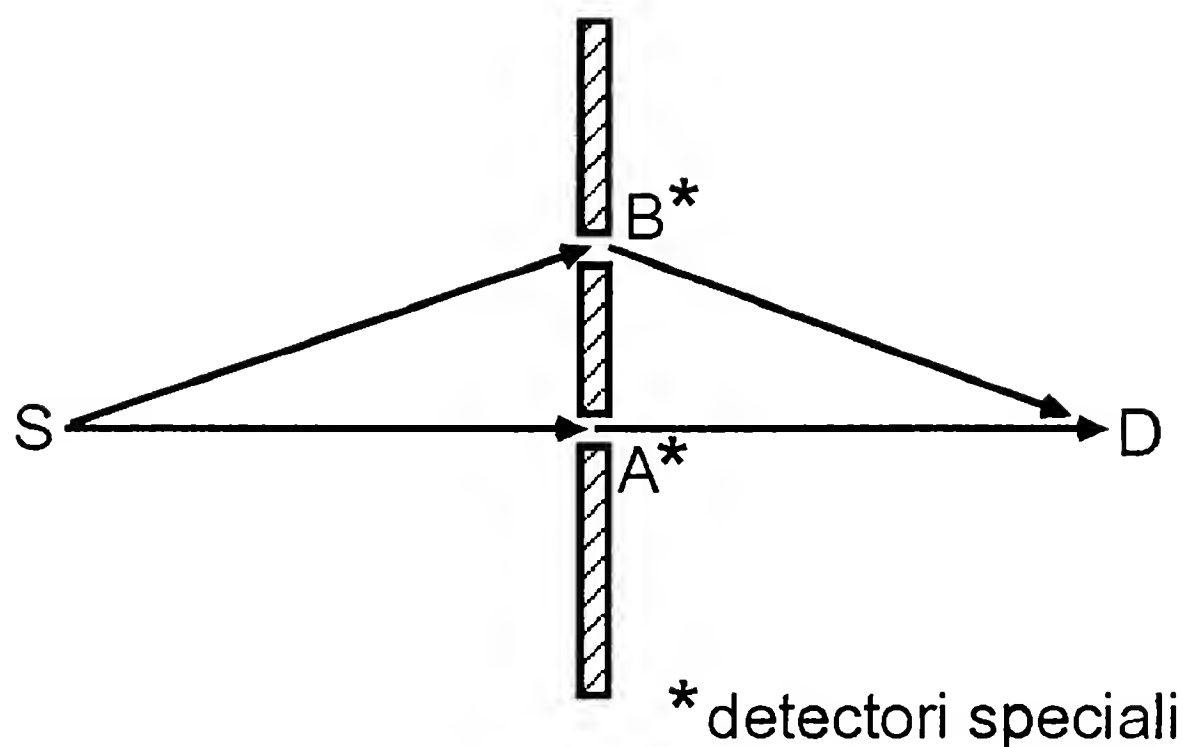
**Figura 49.** Două mici orificii (A și B) practicate într-un paravan plasat între sursa S și detectorul D, lasă să treacă aproximativ aceeași cantitate de lumină (în cazul nostru, 1%), atunci când oricare dintre ele este deschis. Atunci când sunt deschise ambele, se produce „interferență”: detectorul clicăie între zero și 4% din timp, în funcție de distanța dintre A și B – așa cum se arată în Figura 51(a).

anumită distanță unul de altul, obținem mai multe clicuri decât cele 2% care ar fi de așteptat (maximul este de aproximativ 4%); dacă ele sunt la o distanță puțin diferită, nu obținem niciun clic.

În mod normal, s-ar putea crede că deschiderea unui al doilea orificiu conduce *totdeauna* la o creștere a cantității de lumină care ajunge la detector, însă practic nu se întâmplă așa. Și astfel, a afirma că lumina merge „fie pe un drum, fie pe celălalt”, este eronat. Mă mai surprind și eu rostind „ei bine, lumina merge fie pe un drum, fie pe celălalt”, însă atunci când spun asta, trebuie să țin cont că mă refer la adunarea amplitudinilor: fotonul prezintă o amplitudine pentru mersul pe un drum și o amplitudine pentru mersul pe celălalt drum. Dacă cele două se opun una alteia, lumina nu va ajunge în acel loc – chiar dacă, în acel caz, ambele orificii sunt deschise.

Acuma, comportarea stranie a Naturii merge un pic încă și mai departe, și aș dori să vă prezint despre ce este vorba. Să presupunem că, atunci când ambele orificii sunt deschise, așezăm niște detectori speciali – unul în A și altul în B (este posibil de proiectat un detector care să ne indice dacă un foton a trecut sau nu prin el) – astfel încât să putem spune prin care orificiu (orificii) trece fotonul (a se vedea





**Figura 50.** Atunci când în punctele A și B sunt plasați niște detectori speciali, care să ne spună pe ce drum merge lumina atunci când ambele orificii sunt deschise, experimentul este alterat. Din cauza faptului că un foton trece întotdeauna prin unul sau prin celălalt dintre orificii (atunci când le urmăriți), există două condiții finale distincte: 1) se declanșează detectorii din A și D; 2) se declanșează detectorii din B și D. Probabilitatea de producere a oricăruia din evenimente este de aproximativ 1%. Probabilitățile celor două evenimente se adună în maniera normală, conducând la o probabilitate de declanșare a detectorului din D de 2% - așa cum se arată în Figura 51(b).

Figura 50). Din moment ce probabilitatea ca un foton singular să ajungă de la S la D nu este afectată decât de distanța dintre orificii, ar trebui să existe vreo modalitate absconsă prin care acesta să se împartă în două, iar apoi să se strângă la loc, este? Potrivit acestei ipoteze, detectorii din A și B ar trebui să se declanșeze totdeauna împreună (cu jumătate de intensitate, poate?), în vreme ce detectorul din D ar trebui să se declanșeze cu o probabilitate între zero și 4%, în funcție de distanța între A și B.

Iată ce se întâmplă de fapt: detectorii din A și B nu se declanșează *niciodată* împreună – se declanșează *ori* A, *ori* B. Fotonul nu se împarte în două. El o ia fie pe un drum, fie pe celălalt.

Mai mult, în astfel de condiții, detectorul din D se declanșează în 2% din situații – suma obișnuită a probabilităților corespunzătoare punctelor A și B (1% + 1%). Valoarea 2% nu este afectată de distanța dintre A și B; atunci când în A și B se plasează niște detectori, interferența *dispare*!

Natura a pus lucrurile la cale în așa fel încât noi să nu fim nicio dată în stare să ne dăm seama cum funcționează Ea: dacă instalăm niște aparate de măsură cu care să aflăm drumul pe care merge lumina, putem afla acest lucru, nicio problemă, dar minunatul efect de interferență dispare. Dar dacă nu avem niște instrumente care să ne spună pe ce drum o ia lumina, efectul de interferență revine! Într-adevăr, foarte straniu!

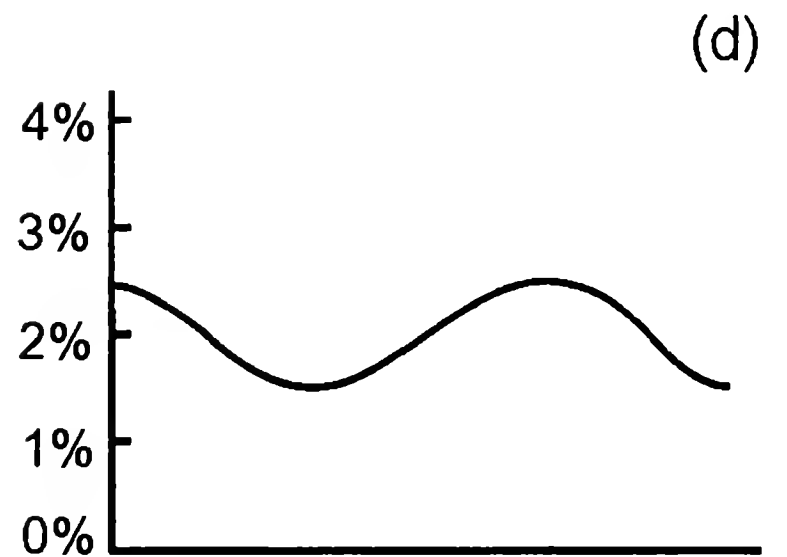
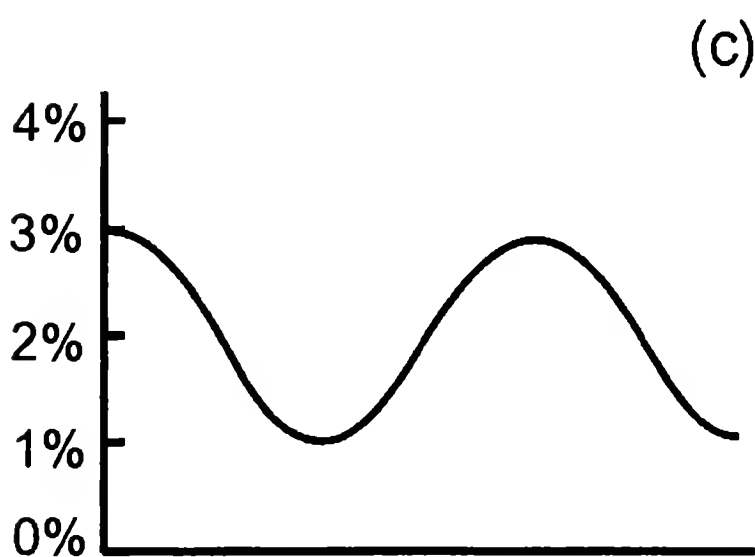
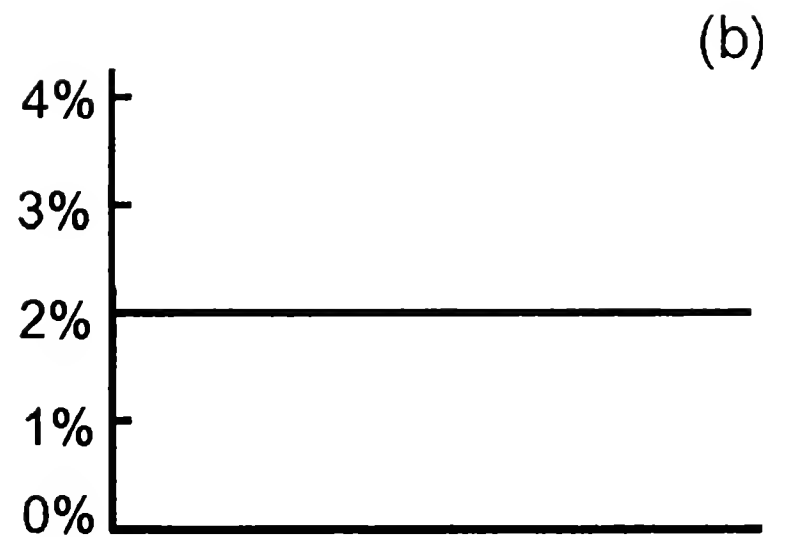
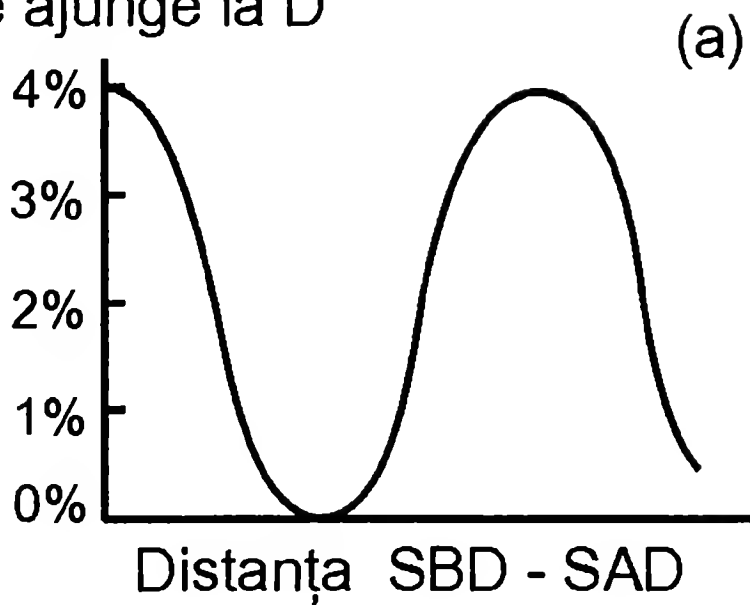
Pentru a înțelege acest paradox, dați-mi voie să vă reamintesc un principiu de cea mai mare importanță: pentru a calcula corect probabilitatea unui eveniment, trebuie avut multă grijă *să se definească în mod clar evenimentul complet* – în particular, să se precizeze clar care sunt condițiile inițiale și finale ale experimentului. Să ne uităm la dispozitivul experimental înainte și după experiment, și să urmărim schimbările. Atunci când calculăm probabilitatea ca un foton să ajungă din S în D fără detectorii plasați în A și B, evenimentul este pur și simplu clicul făcut de detectorul din D. Atunci când singura schimbare de condiții o reprezintă clicul din D, nu avem cum să spunem prin care din orificii a trecut fotonul, deci obținem interferență.

Atunci când plasăm detectori în A și B, schimbăm datele problemei. Acum se dovedește că avem *două* evenimente complete – două seturi de condiții finale – distincte: 1) se declanșează detectorii din A și D; 2) se declanșează detectorii din B și D. Atunci când, în cadrul unui experiment, avem un număr de condiții finale posibile, probabilitatea fiecăreia din ele trebuie calculată ca un eveniment separat, complet.

Pentru a calcula amplitudinea de declanșare a detectorilor din A și D, înmulțim săgețile corespunzătoare următorilor pași: un foton se deplasează din S în A; un foton se deplasează din A în D; detectorul din D se declanșează. Pătratul săgeții finale reprezintă probabilitatea acestui eveniment – 1% – aceeași ca în cazul în care orificiul B ar fi închis, căci în ambele cazuri avem aceiași pași. Celălalt eveniment complet este acela ca detectorii din B și D să se declanșeze. Probabilitatea acestuia se calculează în mod similar, și este – la fel ca mai sus – egală tot cu aproximativ 1%.

Dacă vrem să aflăm cât de des se declanșează detectorul din D, fără să ținem cont dacă pe parcursul procesului s-a declanșat detectorul din A ori cel din B, probabilitatea se determină prin simpla însumare a celor două evenimente – 2%. În principiu, dacă în sistem rămâne ceva ce *am fi putut* observa pentru a spune pe care drum a luat-o fotonul, atunci avem „stări finale” diferite (condiții finale distincte), și

Procentul de lumină  
care ajunge la D



**Figura 51.** Atunci când în A și B nu există detectori, apare fenomenul de interferență – cantitatea de lumină variază între zero și 4% (a). Atunci când în A și B se află niște detectori cu fiabilitate 100%, nu apare interferență – cantitatea de lumină ce ajunge în D este în mod constant 2% (b). Atunci când detectorii din A și B nu au fiabilitate de funcționare de 100% (adică, atunci când *uneori* în A sau în B nu rămâne nicio urmă a trecerii unui foton care să poată fi detectată), există trei condiții finale posibile – fie să se declanșeze A și D, fie să se declanșeze B și D, fie să se declanșeze numai D. În acest caz, curba finală reprezintă o mixtură, alcătuită din contribuțiile fiecărei condiții finale posibile. Atunci când detectorii din A și B sunt mai puțin de încredere, este prezentă mai multă interferență. Astfel, detectorii din varianta (c) sunt mai puțin fiabili decât cei din varianta (d). Principiul referitor la interferență este următorul: probabilitatea corespunzătoare fiecărei condiții finale posibile trebuie calculată separat, adunând săgeți și ridicând la pătrat lungimea săgeții finale; apoi, acele câteva probabilități se adună în manieră obișnuită.

pentru fiecare stare finală trebuie să adunăm *probabilitățile*... nu amplitudinile.<sup>1</sup>

Am subliniat aceste lucruri deoarece, cu cât observați mai mult cât de straniu se comportă Natura, cu atât este mai greu să imaginați un model care să explice maniera în care funcționează până și cele mai simple fenomene. Așa încât fizica teoretică s-a dat bătută în această privință.

Am văzut în prima prelegere modalitatea în care un eveniment poate fi împărțit în mai multe maniere alternative și felul în care pot fi „adunate” săgețile corespunzătoare fiecărui mod în parte. În a doua prelegere, am văzut felul în care fiecare modalitate poate fi împărțită în mai mulți pași succesivi, faptul că săgeata corespunzătoare fiecărui pas poate fi privită ca transformarea unei săgeți unitate, și felul în care săgețile respective pot fi „înmulțite” prin intermediul unor contracții și rotații succesive. Așadar, ne sunt familiare toate regulile necesare pentru desenarea și compunerea săgeților reprezentând frânturi de eveniment, pentru a obține săgeata finală al cărei pătrat reprezintă probabilitatea unui eveniment observat în natură.

Este firesc să ne punem întrebarea cât de departe putem merge cu acest proces de descompunere a evenimentelor în subevenimente din ce în ce mai simple. Care sunt cele mai mici crâmpoie posibile de eveniment? Există oare un număr finit de fragmente care să poată fi compuse spre a forma *toate* fenomenele ce implică lumină și electroni? Există oare un număr finit de „litere” în cadrul acestui limbaj al electrodinamicii cuantice, care să poată fi combinate pentru a forma „cuvinte” și „fraze” în stare să descrie aproape orice fenomen din natură?

---

<sup>1</sup> Povestea completă în legătură cu această situație este foarte interesantă: dacă detectorii din A și B nu sunt perfecți și detectează fotonii doar în *unele* dăți, atunci există *trei* condiții finale distincte: 1) se declanșează detectorii din A și D; 2) se declanșează detectorii din B și D; 3) se declanșează numai detectorul din D, cei din A și B rămânând nemodificați (rămânând în starea lor inițială). Probabilitatea pentru primele două evenimente se calculează în maniera explicată mai sus (cu singura deosebire că pentru probabilitatea ca detectorul din A – sau din B – să se declanșeze, va exista o contracție, întrucât ei nu sunt ideali). Atunci când se declanșează numai detectorul din D, cele două variante nu pot fi separate, și natura se joacă cu noi introducând interferență – același rezultat ciudat pe care l-am fi obținut și dacă nu ar fi existat detectori deloc (doar că acum săgeata finală se contractă corespunzător amplitudinii ca detectorii să *nu* se declanșeze). Rezultatul final este un melanj, simpla însumare a tuturor celor trei cazuri (a se vedea Figura 51). Cu cât siguranța în funcționare a celor doi detectori crește, cu atât obținem mai puțină interferență.

Răspunsul este afirmativ; acest număr este numărul trei. Există doar trei acțiuni de bază necesare pentru a produce toate fenomenele asociate cu lumina și cu electronii. Mai înainte de a vă spune care sunt aceste trei acțiuni de bază, ar trebui să vă prezint așa cum se cuvine actorii. Actorii sunt fotonii și electronii. Fotonii, particulele de lumină, au fost discutați pe larg în primele două prelegeri. Electronii au fost puși în evidență ca particule în 1895: ei pot fi numărați – poate fi dispus un electron pe o picătură fină de ulei, căreia să i se determine sarcina electrică. Treptat, a devenit evident că mișcarea acestor particule este răspunzătoare de curentul electric din firele de sârmă.

La scurt timp după descoperirea electronilor, s-a avansat ideea că atomii ar fi ca niște minuscule sisteme solare, alcătuite dintr-o parte centrală grea (numită nucleu) și din electroni, care se rotesc pe „orbite” cam la fel cum planetele se învârtesc în jurul Soarelui. Dacă vă închipuiți cumva că atomii chiar arată așa, înseamnă că încă mai trăiți în anul 1910. În 1924, Louis de Broglie a descoperit faptul că există o caracteristică ondulatorie asociată electronilor, iar curând după aceea, C. J. Davisson și L. H. Germer, de la Bell Laboratories, au bombardat cu electroni un cristal de nichel și au arătat că electronii ricoșează și ei sub unghiuri aiuritoare (asemenea razelor X) și că aceste unghiuri pot fi calculate din formula lui de Broglie referitoare la lungimea de undă asociată unui electron.

Atunci când privim fotonii la scară mare – mult mai mare decât distanța corespunzătoare unei rotiri a acului cronometrului – fenomenele pe care le observăm sunt approximate foarte bine de reguli precum „lumina se propagă în linie dreaptă”, deoarece există suficiente drumuri în jurul drumului de timp minim pentru ca ele să poată conlucra între ele, și suficiente alte drumuri care să se contracareze între ele. Însă atunci când spațiul prin care trece un foton devine prea mic (așa ca minusculele orificii din paravan), aceste reguli eșuează – descoperim că lumina nu trebuie să se propage în linie dreaptă, cele două orificii produc interferență, și așa mai departe. Cu electronii se întâmplă exact la fel: priviți la scară mare, ei se deplasează precum particulele, pe traiectorii bine definite. Dar la scară mică, așa cum ar fi în interiorul unui atom, spațiul este atât de restrâns încât nu există un drum principal, nu există „orbită”; există tot felul de moduri în care s-ar putea deplasa un electron, fiecare cu amplitudinea sa. Fenomenul de interferență devine foarte important și, pentru a putea prezice locul unde este de așteptat să se găsească un electron, trebuie să adunăm săgețile corespunzătoare.

Este cât se poate de interesant să notăm că la început electronii au părut a fi particule, și că abia apoi a fost descoperit caracterul lor ondulatoriu. Pe de altă parte, cu excepția faptului că Newton a făcut o greșeală și a crezut că lumina este „corpusculară”, lumina a părut la început a fi o undă, și abia după aceea a fost descoperit caracterul ei corpuscular. În fapt, ambele obiecte se comportă întrucâtva ca unde și întrucâtva ca particule. Pentru a ne scuti de efortul de a inventa noi cuvinte precum „ondusculi”, am decis să numim aceste obiecte „particule”, dar știm cu toții că ele se supun acestor reguli referitoare la desenarea și compunerea săgeților, pe care vi le-am descris. Se pare că toate „particulele” din natură – quarkuri, gluoni, neutrini și așa mai departe (ele vor fi discutate în prelegerea următoare) – se comportă în această manieră a mecanicii cuantice.

Așa încât vă voi face acum cunoștință cu cele trei acțiuni de bază, din care decurg toate fenomenele legate de lumină și de electroni.

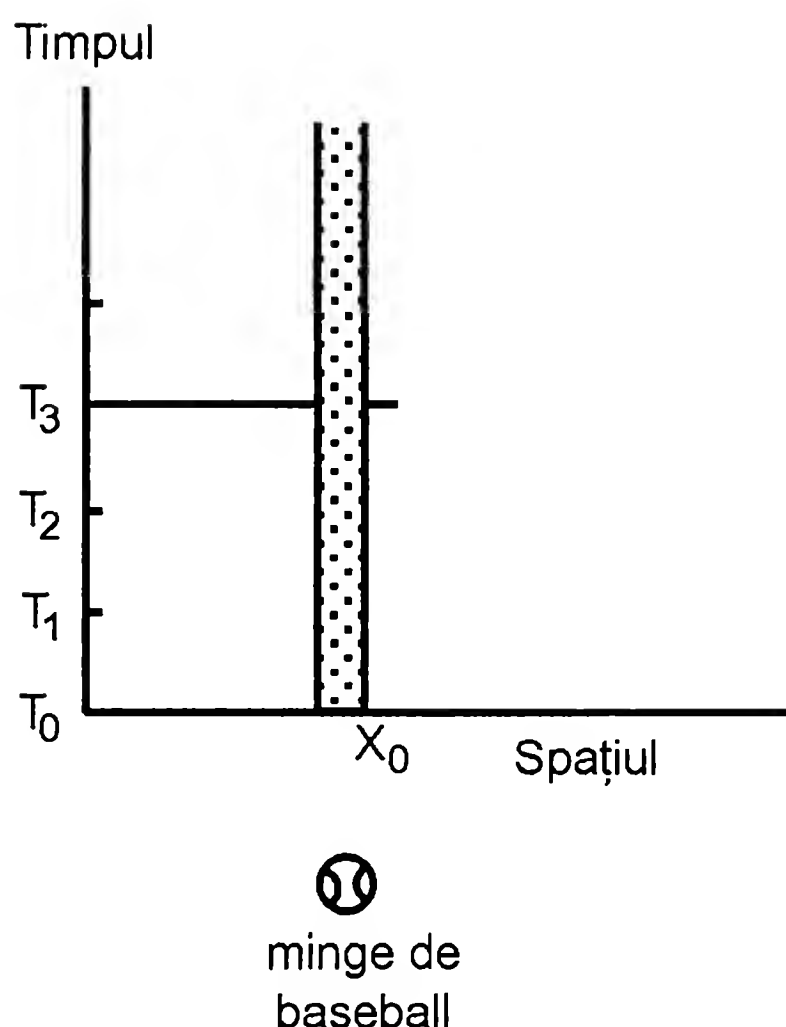
- ACȚIUNEA nr. 1: Un foton se deplasează dintr-un loc în altul;
- ACȚIUNEA nr. 2: Un electron se deplasează dintr-un loc în altul;
- ACȚIUNEA nr. 3: Un electron emite sau absoarbe un foton.

Fiecare din aceste acțiuni prezintă o amplitudine – o săgeată – care poate fi calculată potrivit unor reguli anume. Imediat vă voi spune aceste reguli, sau legi, din care putem concepe întreaga lume (cu excepția nucleelor și gravitației, ca întotdeauna!).

Acuma, scena pe care se desfășoară aceste acțiuni nu este numai spațiul, ci spațiul și timpul. Până aici nu am luat în discuție chestiunile legate de timp, cum ar fi problema momentului exact în care un foton părăsește sursa și a momentului exact în care el ajunge la detector. Deși spațiul real este tridimensional, pe desenele pe care le voi face, eu îl voi reduce la o singură dimensiune: voi reprezenta pe axa orizontală poziția anumită a obiectului în spațiu, iar pe axa verticală momentul de timp corespunzător.

Primul eveniment pe care îl voi desena în spațiu și timp – sau spațiotimp, cum s-ar putea să-l mai numesc la repezeală – îl reprezintă o minge de baseball aflată în repaus (a se vedea Figura 52). Joi dimineața, moment pe care îl voi nota  $T_0$ , mingea ocupă un anumit loc în spațiu, pe care îl voi nota  $X_0$ . După câteva clipe, la momentul  $T_1$ , ea ocupă același loc, fiind în repaus. Încă și mai târziu, la  $T_2$ , mingea se află în continuare în  $X_0$ . Deci graficul unei mingi de baseball în repaus este o bandă verticală, ce se derulează în sus și conține mingea peste tot.



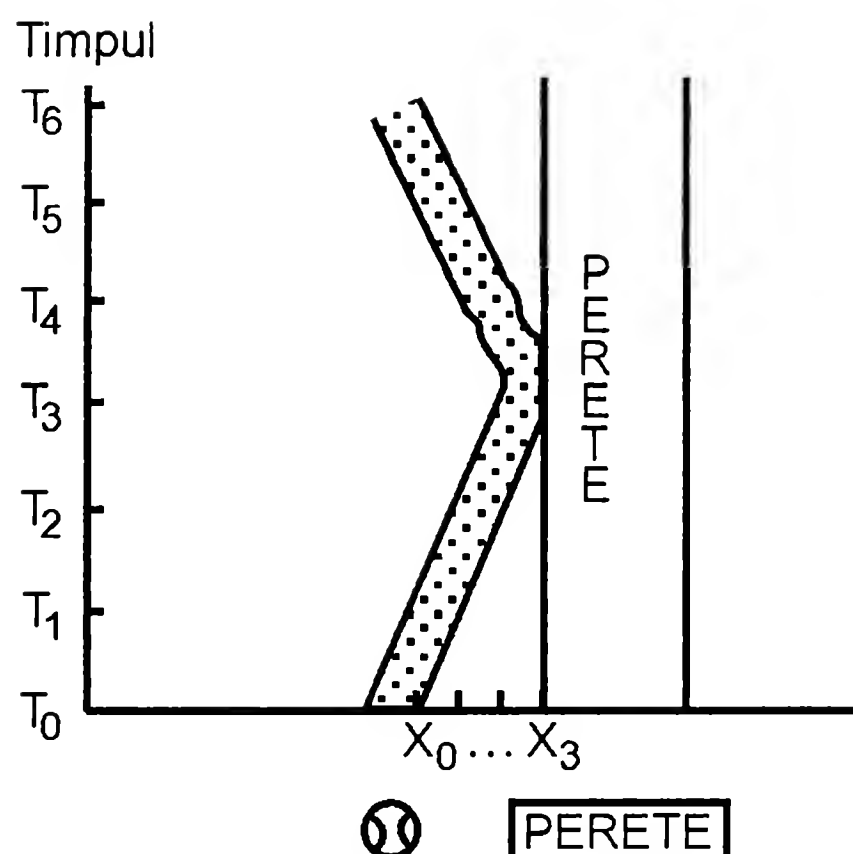


**Figura 52.** Scena pe care au loc toate acțiunile din Univers este spațiu-timpul. Deși constând în general din patru dimensiuni (trei spațiale și una temporală), spațiu-timpul va fi reprezentat în cazul de față în două dimensiuni – una pentru spațiu, de-a lungul axei orizontale, și una pentru timp, de-a lungul celei verticale. De fiecare dată când privim mingea de baseball (cum ar fi, de exemplu, la momentul  $T_3$ ), ea se află în exact același loc. Acest lucru dă naștere unei „benzi de baseball” care urcă vertical, odată cu trecerea timpului.

Ce se întâmplă dacă avem o minge de baseball plutind în spațiul cosmic în imponderabilitate, și îndreptându-se către un perete? Ei bine, joi dimineața ( $T_0$ ) ea pornește din  $X_0$  (a se vedea Figura 53), dar un pic mai târziu nu se mai află în același loc – s-a deplasat puțin, până în  $X_1$ . Pe măsură ce mingea continuă să plutească, ea dă naștere pe diagrama spațiu-timp unei „benzi de baseball” oblice. În momentul în care mingea lovește peretele (care se află în repaus și, ca atare, este reprezentat de o bandă verticală), ea se întoarce exact de unde a plecat ( $X_0$ ), dar la un alt moment de timp ( $T_6$ ).

În ceea ce privește axa timpului, este mult mai convenabil să reprezentăm diviziunile nu în secunde, ci în unități mult mai mici. Din moment ce avem de-a face cu fotoni și cu electroni, care se deplasează foarte repede, voi considera că un unghi de  $45^\circ$  reprezintă ceva care se mișcă cu viteza luminii. De exemplu, pentru o particulă care se



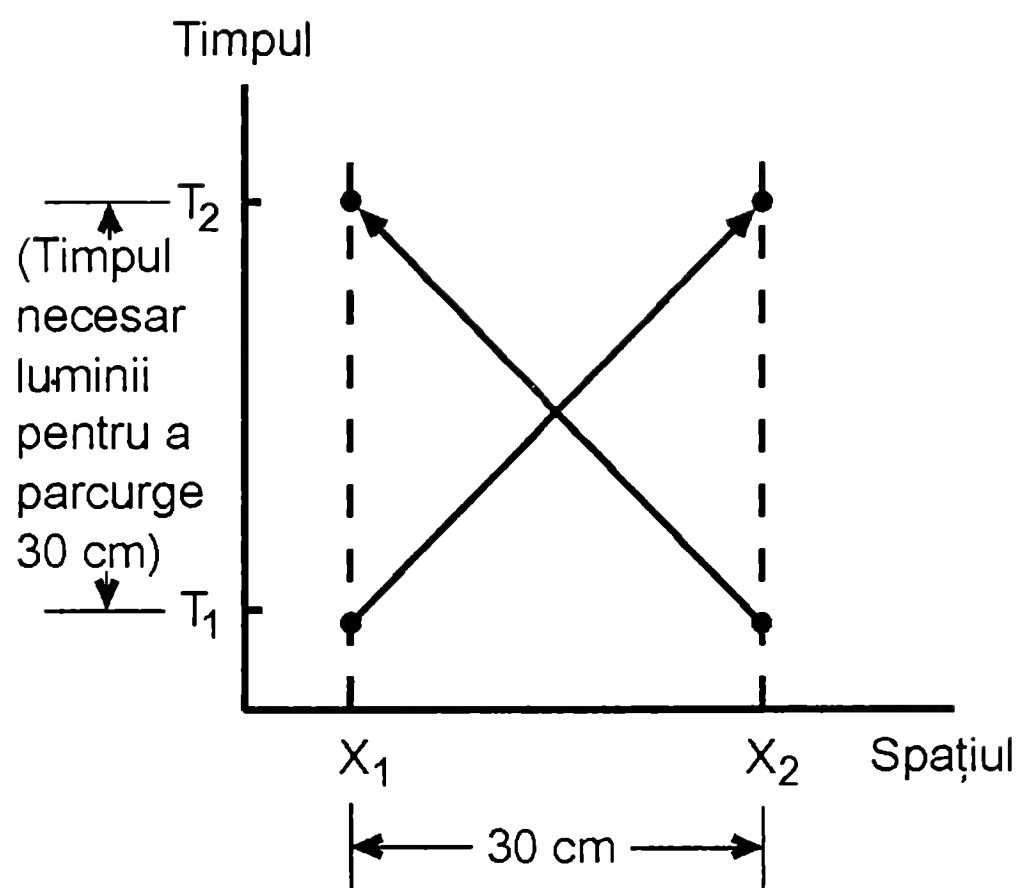


**Figura 53.** O minge de baseball care plutește în linie dreaptă către un perete, îl ciocnește frontal și ricoșează înapoi până în punctul de plecare (reprezentat sub grafic), se deplasează într-o singură dimensiune, și apare pe desen ca o „bandă de baseball” înclinată. La momentele de timp  $T_1$  și  $T_2$  mingea se apropie de perete; la momentul  $T_3$  ea lovește peretele și o ia înapoi.

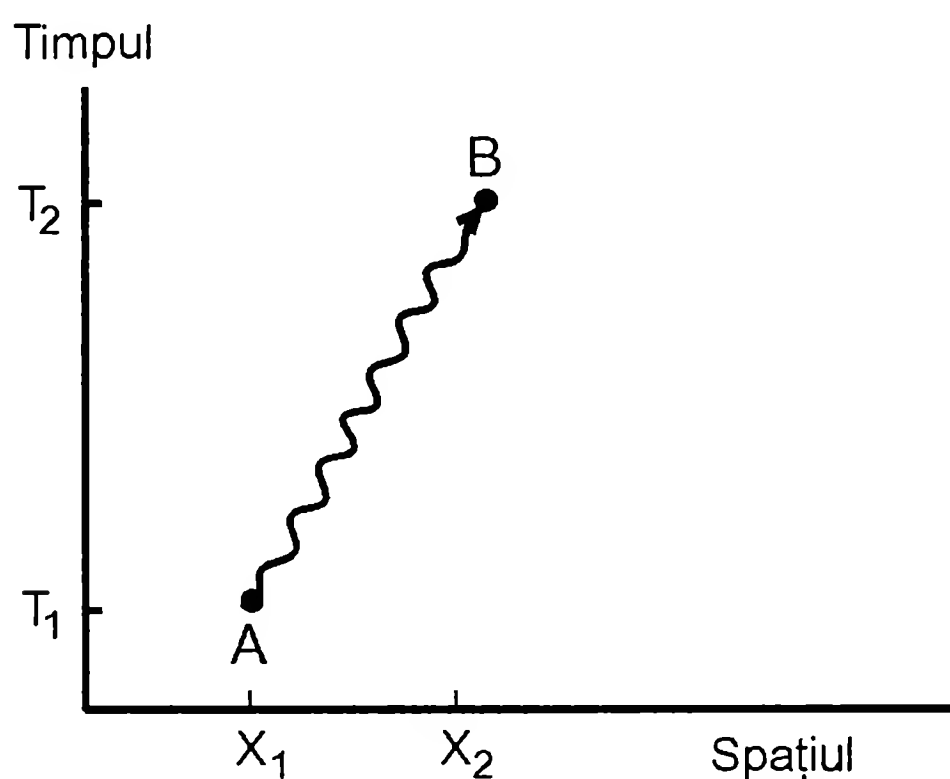
deplasează cu viteza luminii de la  $X_1T_1$  la  $X_2T_2$ , distanța pe orizontală între  $X_1$  și  $X_2$  este egală cu distanța pe verticală între  $T_1$  și  $T_2$  (a se vedea Figura 54). Factorul cu care este multiplicat timpul (pentru ca un unghi de  $45^\circ$  să reprezinte o particulă ce se deplasează cu viteza luminii) se notează cu  $c$ , și îl veți regăsi peste tot în cadrul formulelor lui Einstein – acest fapt este rezultatul alegerii nefericite a secunde ca unitate de măsură a timpului, în locul alegerii intervalului necesar luminii pentru a străbate o distanță de un metru.

Haideți să privim în detaliu prima acțiune de bază – un foton se deplasează dintr-un loc în altul. Fără vreun motiv anume, vom desena această acțiune sub forma unei linii ondulate între A și B. Ar trebui să fiu mai atent în exprimare: ar trebui să spun că un foton despre care se știe că se află într-un anumit loc la un anumit moment de timp, are o anumită amplitudine de ajungere într-un alt loc la un alt moment de timp. Pe graficul meu spațiu-timp (a se vedea Figura 55), fotonul din punctul A – de la  $X_1$  și  $T_1$  – are o anumită amplitudine de apariție în punctul B – la  $X_2$  și  $T_2$ . Voi nota valoarea acesteia cu  $F$  (de la A la B).

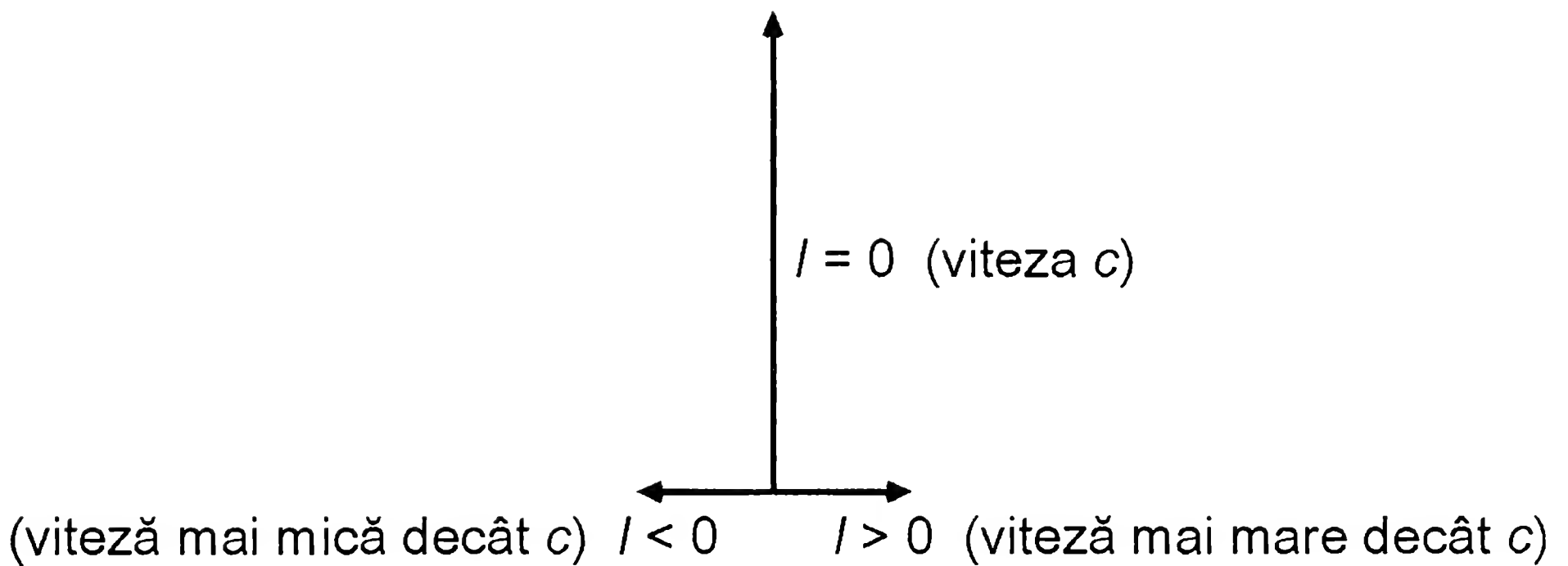
Există o formulă pentru mărimea acestei săgeți,  $F$  (de la A la B). Este vorba despre una din marile legi ale Naturii, și este foarte simplă.



**Figura 54.** Scara timpului pe care o voi folosi în aceste grafice va arăta particulele care se deplasează cu viteza luminii ca mișcându-se sub un unghi de  $45^\circ$  în spațiotimp. Durata necesară luminii pentru a parcurge 30 de centimetri – de la  $X_1$  la  $X_2$  sau de la  $X_2$  la  $X_1$  – este de aproximativ o miliardime de secundă.



**Figura 55.** Un foton (reprezentat aici ca o linie ondulată) are o anumită amplitudine de ajungere dintr-un punct A din spațiotimp, într-un alt punct B. Această amplitudine, pe care o voi nota cu  $F$  (de la A la B), se calculează cu o formulă care depinde numai de diferența de poziție –  $(X_2 - X_1)$  – și de diferența de timp –  $(T_2 - T_1)$ . În fapt, este vorba de o funcție simplă, care reprezintă inversul diferenței pătratelor lor. Această ultimă diferență este denumită „interval”  $I$ , și poate fi scrisă sub forma  $(X_2 - X_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$ .



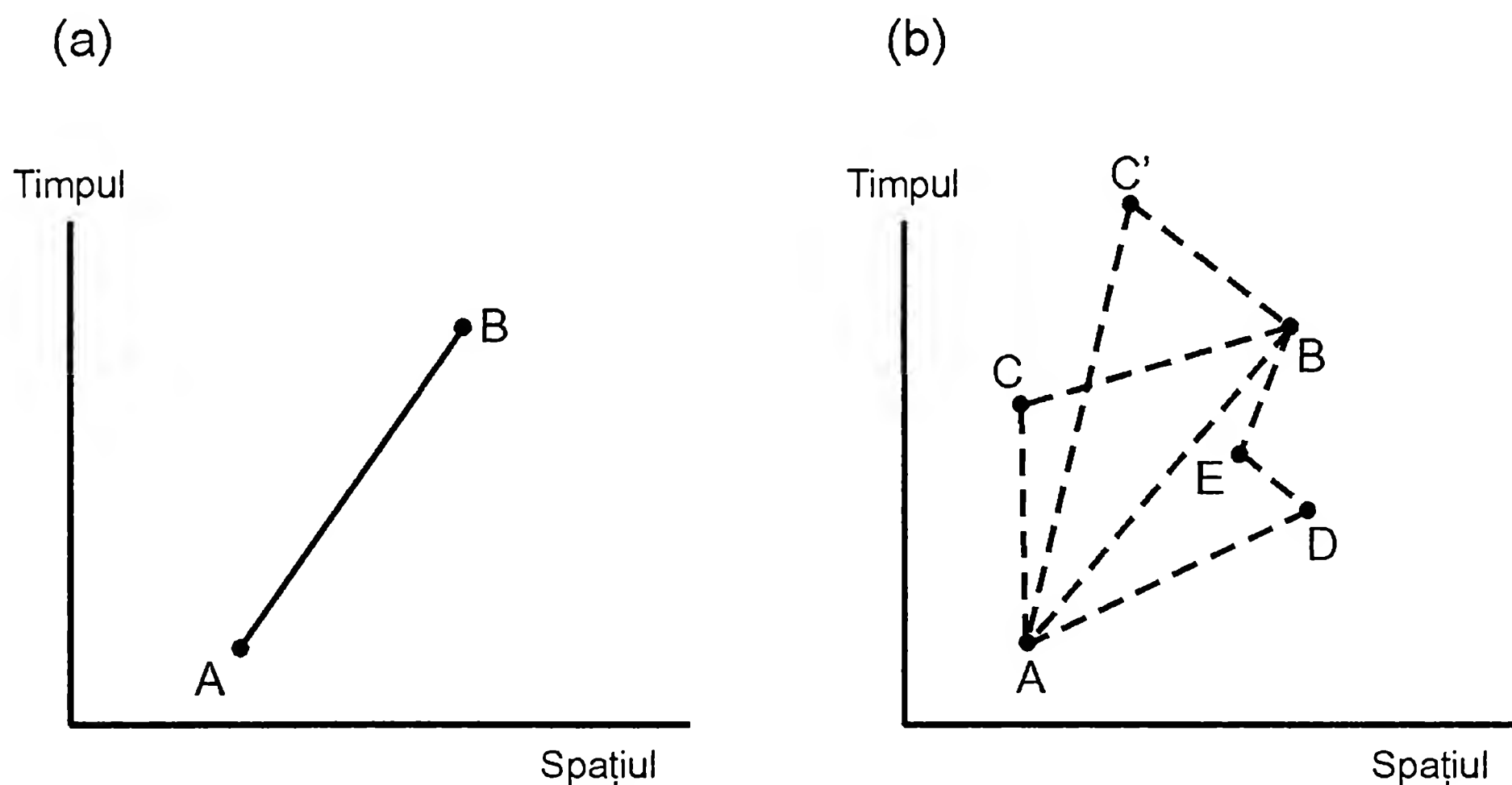
**Figura 56.** Atunci când lumina se propagă cu viteza convențională,  $c$ , „intervalul“,  $I$ , este egal cu zero, și avem o contribuție mare, orientată la ora 12. Atunci când  $I$  este mai mare ca zero, există o contribuție mică, orientată la ora 3, invers proporțională cu  $I$ ; atunci când  $I$  este mai mic ca zero, există o contribuție similară, înspre ora 9. Așadar, lumina prezintă câte o amplitudine de propagare cu viteză mai mare și respectiv mai mică decât  $c$ , dar, pe distanțe lungi, acestea două se anulează reciproc.

Ea depinde de diferența *de distanță* și de diferența *de timp* dintre cele două puncte. Aceste diferențe pot fi exprimate matematic<sup>2</sup> sub forma  $(X_2 - X_1)$  și  $(T_2 - T_1)$ .

<sup>2</sup> Pe parcursul acestor prelegeri, eu trasez poziția unui punct în spațiu într-o singură dimensiune, de-a lungul axei  $X$ . Pentru a localiza poziția unui punct într-un spațiu cu trei dimensiuni, trebuie gândit un „colț de cameră“ și trebuie măsurate distanțele de la punct la podea și la cei doi pereți care se îmbină acolo (toate perpendiculare unele pe altele). Cele trei valori pot fi notate  $X_1$ ,  $Y_1$  și  $Z_1$ . Distanța propriu-zisă de la acel punct la altul, caracterizat de  $X_2$ ,  $Y_2$ ,  $Z_2$ , se poate calcula cu o „teoremă a lui Pitagora în trei dimensiuni“: pătratul acestei distanțe este  $(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2$ . Rezultatul obținut în urma scăderii dintre *acest pătrat al distanței* și pătratul diferenței de timp –  $(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 - (T_2 - T_1)^2$  – se mai numește uneori „Interval“, sau  $I$ , și reprezintă expresia de care depinde  $F$  (de la  $A$  la  $B$ ) potrivit Teoriei Relativității a lui Einstein. Cea mai mare parte a contribuției la săgeata finală corespunzătoare lui  $F$  (de la  $A$  la  $B$ ) provine exact de acolo de unde ne așteptam – de la situația în care distanța este egală cu diferența de timp (adică, de la cazul în care  $I$  este egal cu zero). Însă, în plus, există și o contribuție din partea cazului în care  $I$  nu este egal cu zero, invers proporțională cu  $I$ : ea este îndreptată către ora 3 atunci când  $I$  este pozitiv (atunci când lumina se deplasează cu viteză mai mare decât  $c$ ), și este îndreptată către ora 9 atunci când  $I$  este negativ. În multe din situații, aceste ultime contribuții se anulează reciproc (a se vedea Figura 56).

Contribuția majoră la  $F$ (de la A la B) vine din partea vitezei convenționale a luminii – atunci când  $(X_2 - X_1)$  este egal cu  $(T_2 - T_1)$  – de unde ne-am aștepta să vină întreaga contribuție. Însă există de asemenea și o amplitudine ca lumina să se propage cu o viteză mai mare (sau mai mică) decât cea convențională. În prelegerea anterioară ați aflat că lumina nu se propagă numai în linie dreaptă; acum descoperiți că ea nu se propagă nici doar cu viteza luminii!

S-ar putea să vă surprindă faptul că există o amplitudine ca un foton să se deplaseze cu viteze mai mari decât cea convențională,  $c$ . Amplitudinile acestor posibilități sunt foarte mici în comparație cu contribuția din partea vitezei  $c$ ; în fapt, atunci când lumina se propagă pe distanțe lungi, ele se anulează reciproc. Totuși, pe distanțe mici – așa cum va fi cazul în multe din diagramele pe care le voi desena – aceste alte posibilități devin de o importanță vitală, și trebuie luate în calcul.



**Figura 57.** Un electron prezintă o anumită amplitudine de a se deplasa dintr-un punct în altul în spațiotimp, pe care o voi nota „E(de la A la B)”. Deși E(de la A la B) va fi reprezentată ca o linie dreaptă ce unește cele două puncte (a), expresia poate fi gândită ca o sumă de multe amplitudini – printre acestea, amplitudinea electronului de a-și schimba direcția în punctele C ori C', într-un „zbor cu o escală”, sau amplitudinea electronului de a-și schimba direcția în punctele D și E, într-un „zbor cu două escale” – care se adaugă drumului direct de la A la B (b). Numărul de câte ori își poate schimba electronul direcția, poate avea orice valoare între zero și infinit, iar punctele în care electronul își poate schimba direcția, în drumul său de la A la B prin spațiotimp, sunt infinit de multe. Toate acestea sunt incluse în E(de la A la B).

Deci, aceasta este prima acțiune de bază, prima lege de bază a fizicii – un foton se deplasează dintr-un loc în altul. Ea explică tot ceea ce este legat de optică: în aceasta constă întreaga teorie a luminii! Mă rog, nu chiar: am omis fenomenul de polarizare (ca de obicei) și interacțiunea luminii cu materia, ceea ce mă conduce la cea de-a doua lege.

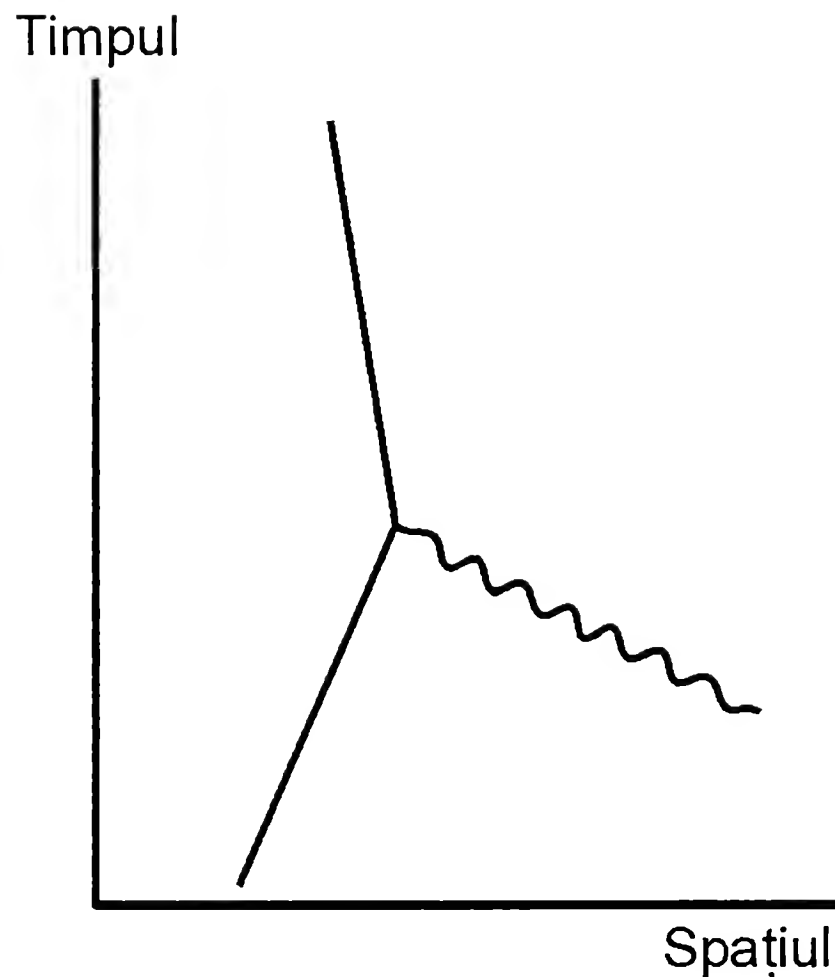
A doua acțiune fundamentală a electrodinamicii cuantice este: un electron se deplasează dintr-un punct A într-un punct B în spațiu-timp. (Pentru moment, ne vom imagina acest electron ca pe unul simplificat, artificial, care nu prezintă polarizare – ceea ce fizicienii numesc „electron cu spin zero”. În realitate, electronii au un tip de polarizare, ce nu aduce nimic în plus ideii de bază, ci doar complică un pic formulele.) Expresia amplitudinii corespunzătoare acestei acțiuni, pe care o voi nota cu  $E$ (de la A la B), depinde și ea de  $(X_2 - X_1)$  și de  $(T_2 - T_1)$  (în aceeași manieră descrisă în nota de subsol 2), și mai depinde și de un număr, pe care îl voi nota cu „ $n$ ”, a cărui valoare odată determinată, permite tuturor calculelor noastre să concorde cu experimentul. (Vom vedea ceva mai târziu modul în care se determină valoarea lui  $n$ .) Formula este cât se poate de complicată, și îmi cer scuze pentru faptul că nu știu cum să o explic în termeni simpli. Totuși, s-ar putea să fiți interesați să aflați că, dacă se ia  $n$  egal cu zero, formula pentru  $F$ (de la A la B) – deplasarea unui foton dintr-un loc în altul în spațiu-timp – este aceeași cu formula pentru  $E$ (de la A la B), deplasarea unui electron dintr-un loc în altul.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Formula pentru  $E$ (de la A la B) este complicată, dar există o manieră interesantă de a explica la ce revine ea.  $E$ (de la A la B) poate fi reprezentată sub forma unei sume nesfârșite de sumedenii de moduri diferite în care un electron ar putea ajunge din punctul A în punctul B în spațiu-timp (a se vedea Figura 57): electronul ar putea efectua un „zbor fără escală”, direct de la A la B; ar putea efectua un „zbor cu o escală”, oprindu-se într-un punct intermediar C; ar putea efectua un „zbor cu două escale”, oprindu-se în punctele D și E; și așa mai departe. În cadrul unei asemenea analize, amplitudinea corespunzătoare fiecărui „salt” – dintr-un punct G într-un punct H – este  $F$ (de la G la H), aceeași cu cea a deplasării unui foton din G în H. Amplitudinea fiecărei „escale” este reprezentată de  $n^2$ ,  $n$  fiind același număr despre care am afirmat mai devreme că servește la asigurarea corectitudinii calculelor noastre.

În consecință, expresia  $E$ (de la A la B) constă într-o serie de termeni:  $F$ (de la A la B) [„zborul fără escală”] +  $F$ (de la A la C)  $\times n^2 \times F$ (de la C la B) [„zborurile cu o escală”, cu oprire în punctele C] +  $F$ (de la A la D)  $\times n^2 \times F$ (de la D la E)  $\times n^2 \times F$ (de la E la B) [„zborurile cu două escale”, cu opriri în D și E] + ..., sumă calculată pentru *toate punctele intermediare posibile* C, D, E și așa mai departe.

Este de remarcat faptul că, atunci când  $n$  crește, contribuția drumurilor indirecte la săgeata finală devine mai mare. Atunci când  $n$  este zero (așa ca în cazul fotonului), toți termenii care conțin factor pe  $n$  dispar (se anulează), lăsând doar primul termen,  $F$ (de la A la B). Așadar,  $E$ (de la A la B) și  $F$ (de la A la B) sunt strâns legate între ele.



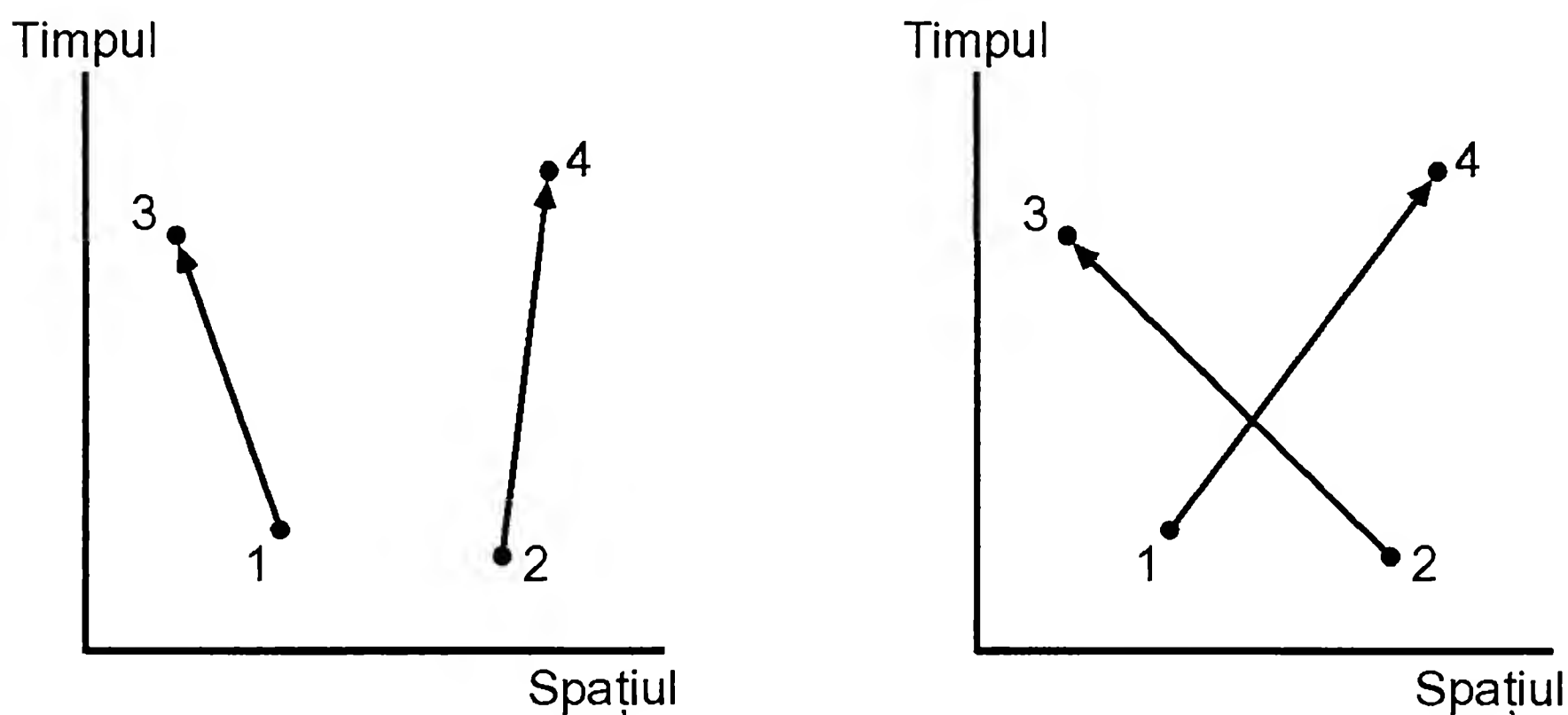
**Figura 58.** Un electron, reprezentat printr-o linie dreaptă, are o anumită amplitudine de a emite sau de a absorbi un foton, acesta din urmă fiind reprezentat printr-o linie ondulantă. Cum amplitudinea de emitere sau absorbție este aceeași, voi numi ambele situații „cuplare”. Amplitudinea corespunzătoare cuplării este un număr pe care îl voi nota  $j$ ; pentru electron, el are aproximativ valoarea  $-0,1$  (uneori, acest număr este numit „sarcină”).

A treia acțiune de bază este: un electron emite sau absoarbe un foton – nu contează care anume din aceste două lucruri. Voi numi această acțiune „joncțiune” sau „cuplare”. Pentru a deosebi electronii de fotoni, fiecare electron ce se deplasează în spațiu-timp va fi reprezentat pe diagrame ca o linie dreaptă. Prin urmare, fiecare cuplare va fi joncțiunea dintre două linii drepte și una ondulantă (a se vedea Figura 58). Nu există vreo formulă complicată pentru amplitudinea emiterii sau absorbției unui foton de către un electron; ea nu depinde de nimic – este pur și simplu un număr! Voi nota acest număr caracteristic joncțiunii cu  $j$ ; valoarea lui este aproximativ  $-0,1$ : o contracție în proporție de circa unu la zece, însoțită de o rotație cu o jumătate de tură.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Acest număr, amplitudinea de emitere sau absorbție a unui foton, se mai numește uneori și „sarcina” particulei respective.

Ei bine, asta-i tot despre aceste acțiuni de bază... cu excepția unei ușoare complicații datorate acestei polarizări pe care am tot scos-o din discuție. Treaba noastră în continuare este să punem laolaltă aceste trei acțiuni, pentru a descrie situații oarecum mai complexe.

Ca un prim exemplu, haideți să calculăm probabilitatea ca doi electroni, aflați în punctele 1 și 2 în spațiu-timp, să ajungă în punctele 3 și 4 (a se vedea Figura 59). Acest eveniment se poate întâmpla în două moduri. Primul mod ar fi ca electronul din 1 să ajungă în 3 – se calculează înlocuind 1 și 3 în formula  $E(\text{de la A la B})$ , adică  $E(\text{de la 1 la 3})$  – iar cel din 2 să ajungă în 4 – se calculează sub forma  $E(\text{de la 2 la 4})$ . Acestea sunt două „subevenimente” ce se petrec concomitent, deci cele două săgeți se înmulțesc pentru a da naștere unei săgeți corespunzătoare acestei prime modalități de producere a evenimentului studiat.



**Figura 59.** Pentru a calcula probabilitatea ca doi electroni, aflați în punctele 1 și 2 în spațiu-timp, să ajungă în punctele 3 și 4, calculăm cu ajutorul formulei  $E(\text{de la A la B})$  săgeata corespunzătoare „primei modalități” (în care electronul din 1 ajunge în 3, iar cel din 2 în 4), apoi calculăm săgeata corespunzătoare „cele de a doua modalități” (în care electronul din 1 ajunge în 4, încrucișându-se cu cel de la 2 la 3) și, în fine, adunăm săgețile corespunzătoare „primei modalități” și „cele de a doua modalități”, obținând o bună aproximație pentru săgeata finală. (Rezultatul este corect pentru electronul artificial, simplificat, cu „spin zero”. Dacă am fi ținut cont și de polarizarea electronilor, în loc să adunăm cele două săgeți corespunzătoare modalităților de producere a evenimentului, ar fi trebuit să le scădem.)



Ca atare, vom scrie expresia „săgeții pentru prima modalitate“ sub forma  $E(\text{de la 1 la 3}) \times E(\text{de la 2 la 4})$ .

Un alt mod în care s-ar putea petrece evenimentul, ar fi ca electronul din 1 să ajungă în 4, iar electronul din 2 să ajungă în 3 – din nou, două subevenimente concomitente. „Săgeata pentru a doua modalitate“ este  $E(\text{de la 1 la 4}) \times E(\text{de la 2 la 3})$ , și ea trebuie adunată cu „săgeata pentru prima modalitate“.<sup>5</sup>

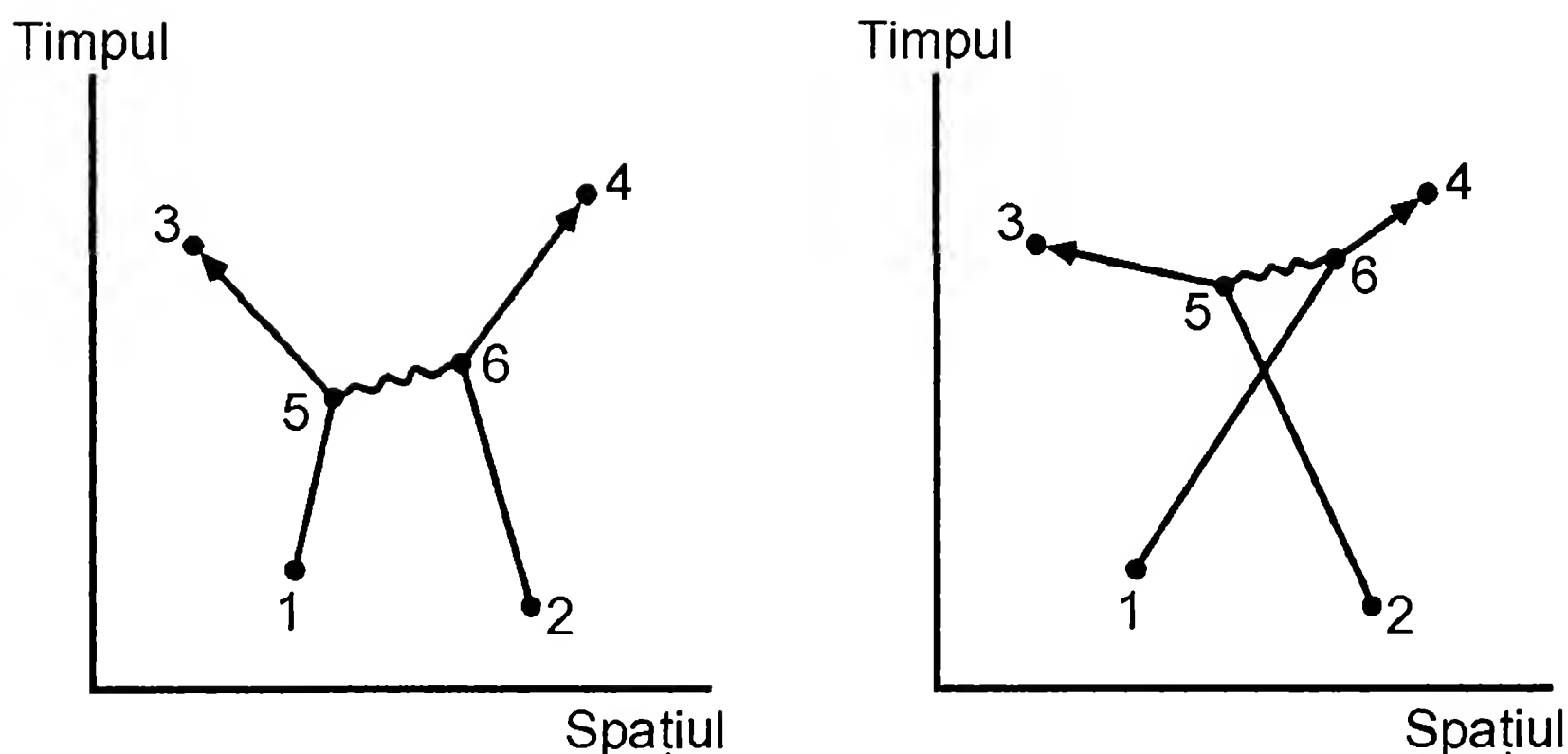
Rezultatul reprezintă o bună aproximare pentru amplitudinea evenimentului în cauză. Pentru a face un calcul mai exact, care să concorde mai bine cu rezultatele experimentale, trebuie să luăm în considerare și alte moduri în care s-ar putea produce acest eveniment. De pildă, pentru fiecare din cele două modalități principale amintite, unul din electroni ar putea să ajungă într-un nou și minunat loc, în care să se descarce, emițând un foton (a se vedea Figura 60). În acest răstimp, celălalt electron ar putea ajunge într-un alt loc, în care să absoarbă un foton. Calcularea amplitudinii pentru aceste noi modalități implică înmulțirea amplitudinilor pentru: electronul din 1 ajunge în noul și minunatul loc, 5 (unde emite un foton), iar apoi ajunge din 5 în 3; celălalt electron ajunge din 2 în celălalt loc, 6 (unde absoarbe un foton), iar apoi ajunge din 6 în 4. Trebuie să ținem minte să includem și amplitudinea ca un foton să ajungă din 5 în 6. Voi scrie amplitudinea acestei modalități de producere a evenimentului, sub o formă matematică de nivel liceal; urmăriți-mă:  $E(\text{de la 1 la 5}) \times j \times E(\text{de la 5 la 3}) \times E(\text{de la 2 la 6}) \times j \times E(\text{de la 6 la 4}) \times F(\text{de la 5 la 6})$  – o grămadă de contracții și de rotiri. (Vă las pe dumneavoastră să stabiliți notația pentru celălalt caz, cel în care electronul din 1 ajunge în 4, iar electronul din 2 ajunge în 3.)<sup>6</sup>

Dar ia stați așa: pozițiile 5 și 6 ar putea fi oriunde în spațiu și timp – da, oriunde – și trebuie calculate și adunate săgețile corespunzătoare *tuturor* acestor poziții. Se întrevește faptul că o să fie mult de lucru. Nu că regulile ar fi prea dificile – este ca la jocul de dame: regulile sunt simple, dar se folosesc iar și iar. Deci dificultatea de calcul provine din faptul că avem de pus laolaltă atât de multe săgeți. De-asta sunt

---

<sup>5</sup> Dacă ar fi inclus efectele de polarizare a electronului, „săgeata pentru a doua modalitate“ ar fi trebuit „scăzută“ – rotită cu  $180^\circ$  și adunată. (Mai pe larg despre aceasta, ceva mai încolo.)

<sup>6</sup> În cazul acestor modalități mai complicate, condițiile finale ale experimentului sunt aceleași ca și în cazul celor două modalități mai simple – electronii pornesc din punctele 1 și 2, și sfârșesc în punctele 3 și 4 – deci nu putem face distincție între aceste alternative și primele. Ca atare, la cele două săgeți luate în discuție un pic mai înainte, trebuie adunate cele corespunzătoare acestor două modalități.



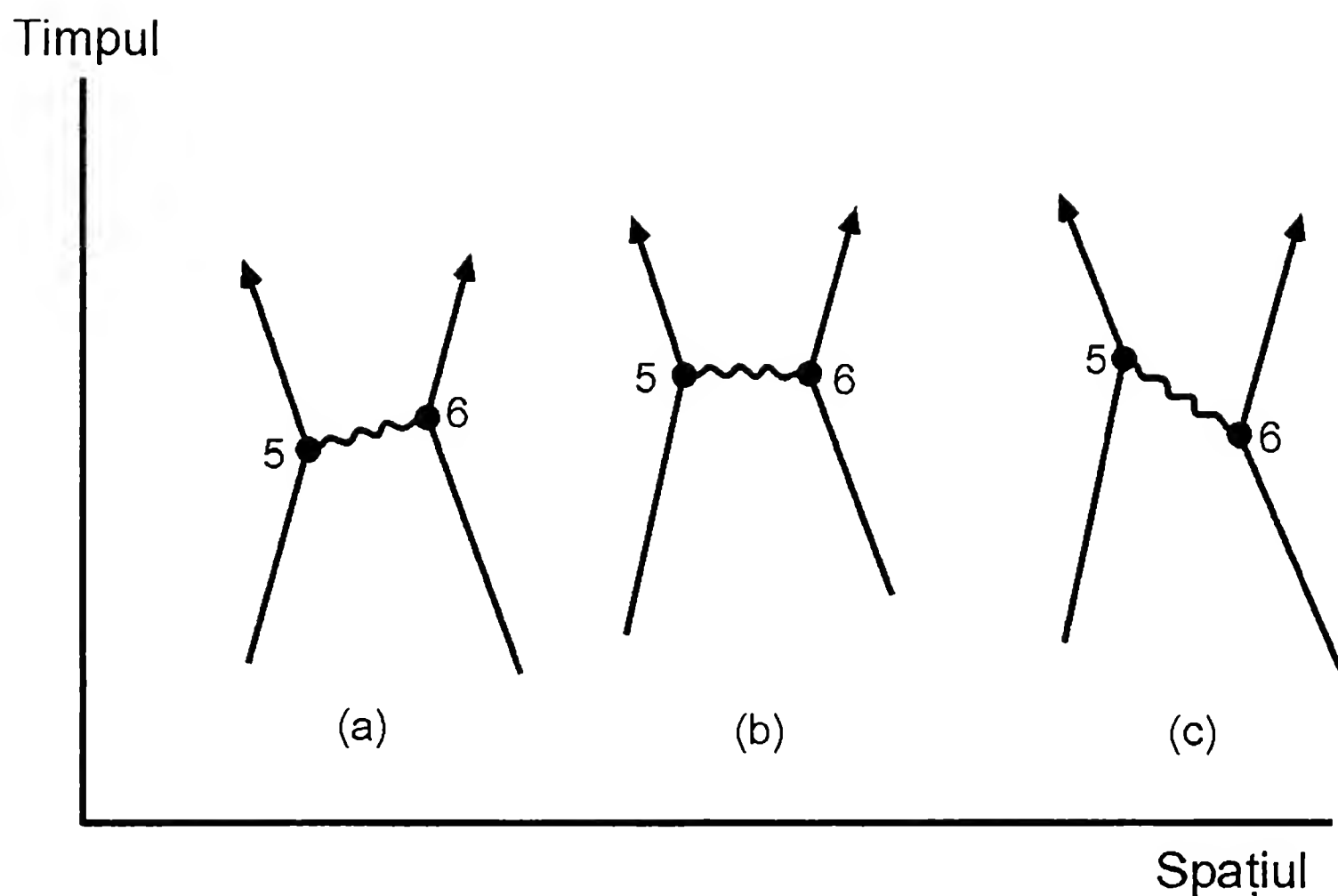
**Figura 60.** Două „alte maniere“ în care s-ar putea petrece evenimentul din Figura 59, sunt următoarele: pentru fiecare din cazurile anterioare, un foton să fie emis în 5 și să fie absorbit în 6. Condițiile finale pentru aceste alternative sunt aceleași ca și pentru primele două – se începe cu doi electroni, și se încheie cu doi electroni – și nu se poate face distincție între rezultatele acestora și ale acestora. Ca atare, pentru a se ajunge la o aproximare mai bună în ceea ce privește săgeata finală a evenimentului, la săgețile din Figura 59 trebuie adunate săgețile corespunzătoare acestor „alte maniere“.

nevoiți studenții înscriși la doctorat să muncească timp de patru ani de zile, până să învețe s-o facă în mod eficient... și încă aici avem de-a face cu o problemă *ușoară*! (Atunci când problemele devin prea dificile, le programăm pe calculator!)

Aș vrea să subliniez un lucru în legătură cu emisia și absorbția de fotoni: dacă punctul 6 este mai târziu decât punctul 5, am putea spune că fotonul a fost emis în 5 și absorbit în 6 (a se vedea Figura 61). Dacă 6 este mai devreme decât 5, atunci am putea prefera să spunem că fotonul a fost emis în 6 și absorbit în 5, dar am putea afirma tot atât de bine că fotonul se deplasează înapoi în timp! Totuși, nu trebuie să ne facem griji în legătură cu direcția în care fotonul s-a deplasat prin spațiotimp: totul este inclus în formula pentru  $F$  (de la 5 la 6), și noi spunem că cei doi electroni au „schimbat“ un foton. Nu-i așa că-i minunat cât de simplă este Natura!?

<sup>7</sup>

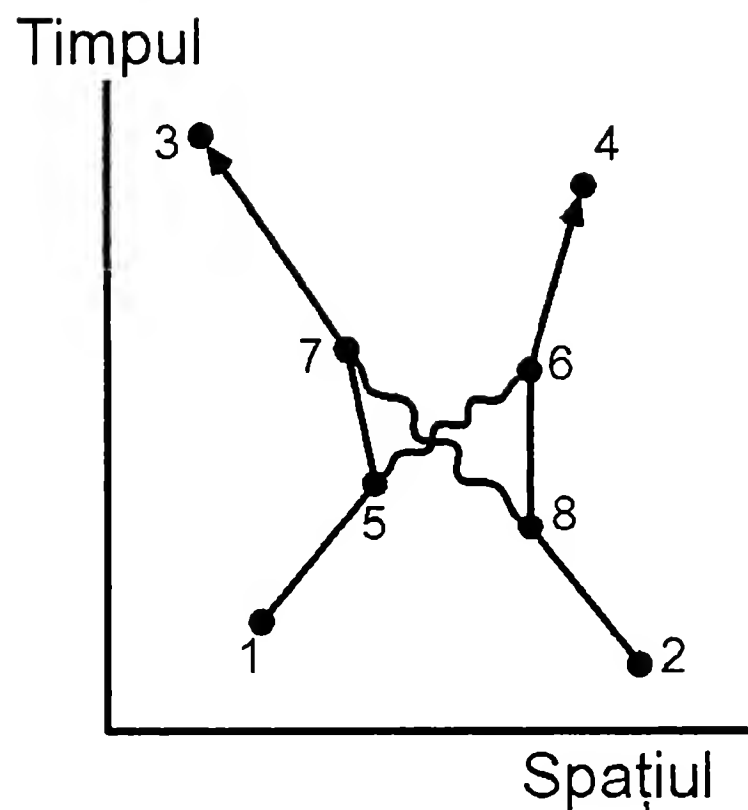
<sup>7</sup> Un astfel de foton schimbat între doi electroni, care nu apare niciodată în cadrul condițiilor inițiale sau finale ale experimentului, se mai numește uneori și „foton virtual“.



**Figura 61.** Întrucât lumina prezintă o amplitudine de a se propaga cu viteză mai mare sau mai mică decât viteza convențională a luminii, fotonii din toate cele trei exemple de mai sus pot fi priviți ca fiind emiși în punctul 5 și absorbiți în punctul 6, chiar dacă fotonul din exemplul (b) este emis *în același moment* în care este absorbit, iar fotonul din exemplul (c) este emis *după* ce este absorbit – o situație în care ați fi preferat să afirmați că el a fost emis în 6 și absorbit în 5; altminteri, fotonul ar trebui să se deplaseze *înapoi în timp*! Din perspectiva doar a calculelor (și a Naturii), este același lucru (și este pe de-a-ntregul posibil), așa încât vom spune pur și simplu că între cei doi electroni a fost „schimbat” un foton, și vom introduce cele două poziții în expresia pentru  $F(\text{de la A la B})$ .

Acuma, în afară de fotonul care este schimbat între 5 și 6, ar mai putea fi schimbat și un alt foton, între alte două puncte – 7 și 8 (a se vedea Figura 62). Sunt prea ostenit să mai scriu toate acțiunile de bază ale căror săgeți trebuie înmulțite, dar – așa cum probabil veți fi observat – fiecare linie dreaptă primește un  $E(\text{de la A la B})$ , fiecare linie ondulată primește un  $F(\text{de la A la B})$ , și fiecare cuplare primește un  $j$ . Astfel, există șase  $E(\text{de la A la B})$ -uri, două  $F(\text{de la A la B})$ -uri și patru  $j$ -uri pentru *fiecare* 5, 6, 7 și 8 *posibile*! Asta înseamnă miliarde de săgeți minuscule ce trebuie înmulțite, iar apoi adunate între ele!

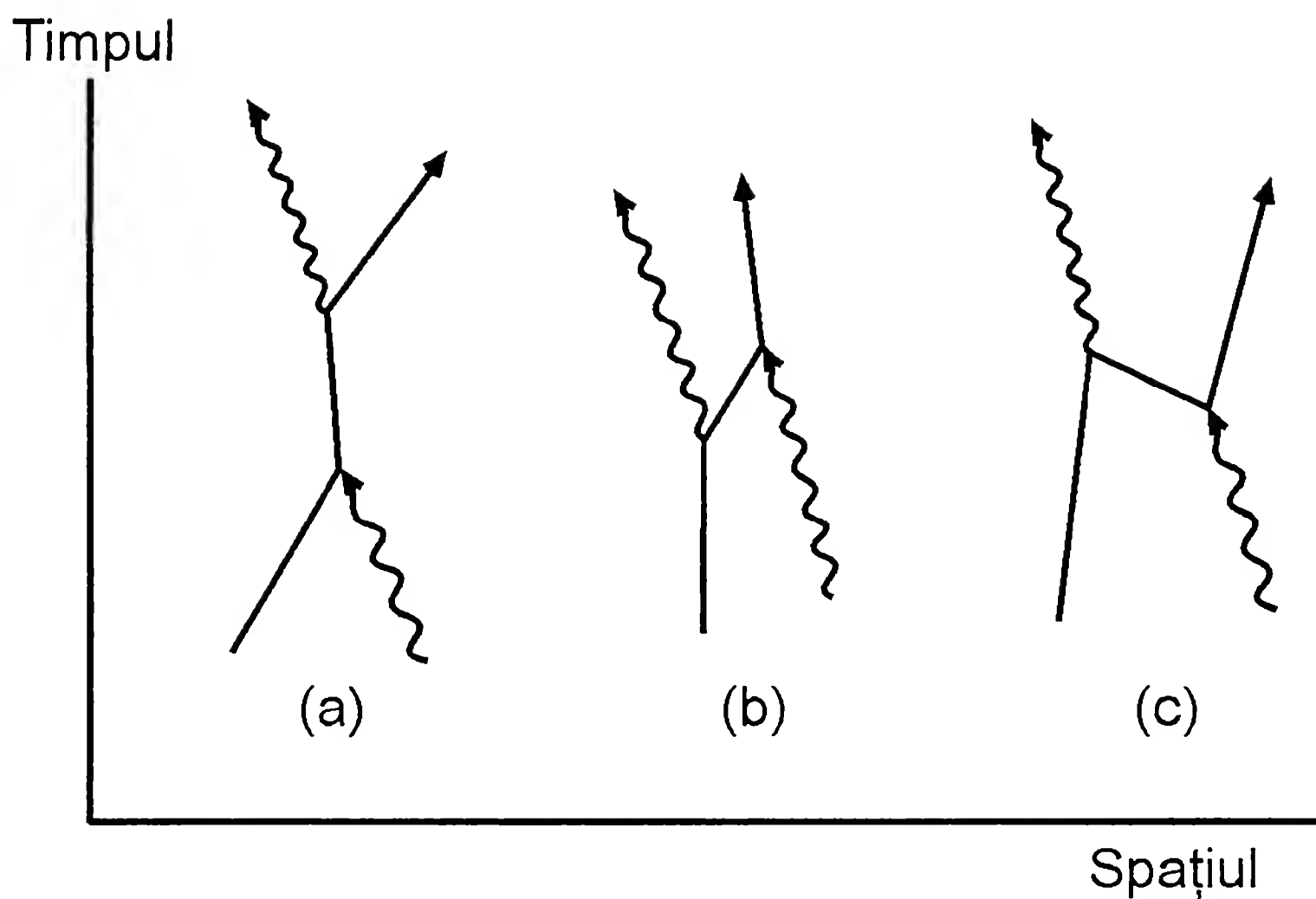
Se vedește că pentru acest simplu eveniment, calcularea amplitudinii este o treabă fără sorți de izbândă, dar atunci când ești doctorand trebuie să-ți iei diploma, așa încât continui să o faci.



**Figura 62.** Încă un mod în care s-ar putea petrece evenimentul din Figura 59 ar fi ca cei doi electroni să schimbe *doi* fotoni. Sunt posibile multe diagrame corespunzătoare acestei modalități (așa după cum vom vedea mai în amănunt ceva mai târziu); una din ele este prezentată în desenul de față. Săgeata corespunzătoare acestei modalități implică toate punctele intermediare 5, 6, 7 și 8 posibile, și se calculează cu mare dificultate. Din cauza faptului că valoarea lui  $j$  este mai mică de 0,1, lungimea acestei săgeți reprezintă în general mai puțin de 1 la 10.000 (sunt implicate patru cuplări) din lungimea săgeților din Figura 59, corespunzătoare „primei modalități” și „cele de-a doua modalități”, săgeți care nu conțin  $j$ -uri.

Însă *există* speranțe de succes. Ele se găsesc în acest număr magic,  $j$ . Primele două moduri în care se putea produce evenimentul nu aveau  $j$ -uri în calcule; următorul mod avea  $j \times j$ , iar ultimul mod studiat avea  $j \times j \times j \times j$ . Cum  $j \times j$  face mai puțin de 0,01, înseamnă că lungimile săgeților corespunzătoare acestor modalități constituie în general mai puțin de 1% din lungimea săgeților corespunzătoare primelor două modalități; o săgeată care conține în expresia ei produsul  $j \times j \times j \times j$ , reprezintă mai puțin de 1% din 1% – o parte la 10.000 – din săgețile care nu conțin  $j$ -uri. Dacă lăsați calculatorul să lucreze suficient de mult timp, puteți calcula posibilitățile care implică  $j^6$  – o parte la un milion – și vă puteți ridica la acuratețea măsurărilor experimentale. În acest fel se determină evenimentele simple. Așa se procedează; asta-i tot!

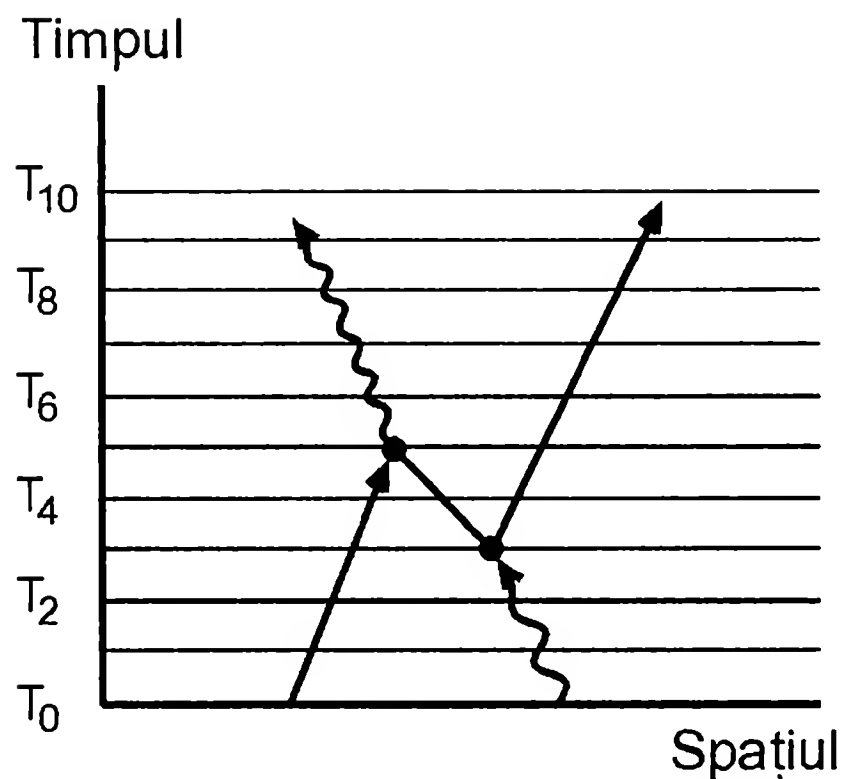
Haideți acum să urmărim un alt eveniment. Plecăm de la un foton și un electron și în final avem tot un foton și un electron. Un



**Figura 63.** Împrăștierea luminii implică un foton intrând într-un electron și un foton ieșind din electron – nu neapărat în această ordine, după cum se vede în exemplul (b). Exemplul (c) prezintă o posibilitate reală dar stranie: electronul emite un foton, se repede înapoi în timp pentru a absorbi un alt foton, după care continuă înainte în timp.

mod în care s-ar putea petrece acest eveniment este următorul: un foton este absorbit de un electron, electronul continuă scurtă vreme de unul singur, iar apoi este emis un nou foton. Acest proces se numește împrăștierea luminii. Atunci când facem calculele și reprezentăm diagramele corespunzătoare împrăstierii, trebuie să includem anumite posibilități ciudate (a se vedea Figura 63). De exemplu, un electron ar putea emite un foton *mai înainte* de a-l absorbi (b). Însă și mai stranie este posibilitatea ca un electron să emită un foton, iar apoi să se *deplaseze înapoi în timp* pentru a absorbi un foton, după care să o ia din nou înainte în timp (c). Traectoria unui asemenea electron aflat „în marșarier” poate fi atât de lungă, încât să apară efectiv ca reală în cadrul unui experiment de laborator. Comportarea lui este inclusă în aceste diagrame și în formula pentru  $E$  (de la A la B).

Atunci când este privit cu timpul curgând normal, electronul care se deplasează înapoi în timp ne apare la fel ca un electron obișnuit, doar că este atras de electronii obișnuiți – spunem că el are



**Figura 64.** Urmărind exemplul (c) din Figura 63 numai în sensul normal de curgere a timpului (așa cum suntem forțați să o facem în laborator), între  $T_0$  și  $T_3$  observăm un electron și un foton ce se îndreaptă unul spre altul. Brusca, la momentul  $T_3$ , fotonul se „dezintegrează” și apar două particule: un electron și un tip nou de particulă (numită „pozitron”), care reprezintă un electron ce se deplasează înapoi în timp și arată ca îndreptându-se către electronul original (către el însuși!). La momentul  $T_5$  pozitronul se anihilează cu electronul original, producând un nou foton. Între timp, electronul creat de fotonul de la început continuă să avanseze în spațiu-timp. Această secvență de evenimente a fost efectiv observată în laborator, și este inclusă în mod automat în formula pentru  $E$  (de la A la B), fără niciun fel de modificare.

o „sarcină electrică pozitivă”. (Dacă aș fi inclus în discuție efectele de polarizare, ar fi devenit evident motivul pentru care semnul lui  $j$  se inversează pentru electronul care dă înapoi, făcând ca sarcina lui electrică să ne apară ca fiind pozitivă.) Din acest motiv, el este numit „pozitron”. Pozitronul este particula-geamănă a electronului, și constituie un exemplu de „antiparticulă”.<sup>8</sup>

Acest fenomen este unul general. Orice particulă din natură prezintă o anumită amplitudine de a se deplasa înapoi în timp și, ca atare, posedă o antiparticulă. Atunci când o particulă și antiparticula ei se

<sup>8</sup> Dirac a avansat ideea realității existenței „antielectronilor” în 1931; un an mai târziu, Carl Anderson i-a descoperit experimental și i-a numit „pozitroni”. Astăzi, putem produce ușor pozitroni (de pildă, ciocnind doi fotoni), pe care să-i păstrăm săptămâni la rând într-un câmp magnetic.

ciocnesc, ele se anihilează reciproc și formează alte particule. (În cazul anihilării electronilor cu pozitronii, este vorba în general de unul-doi fotoni.) Și cum rămâne cu fotonii? Fotonii arată absolut identic din toate punctele de vedere atunci când se deplasează înapoi în timp – așa după cum am văzut mai devreme – și deci constituie propriile lor antiparticule. Vedeți cât de șmecheri suntem încât să facem dintr-o excepție o parte a regulii?!

Aș dori să vă prezint cum arată pentru noi acești electroni care dau cu spatele, atunci când noi înaintăm în timp. Voi împărți diagrama în intervale de timp de la  $T_0$  la  $T_{10}$ , prin intermediul unor drepte paralele pe care să le putem urmări mai ușor (a se vedea Figura 64). Începem la momentul  $T_0$  cu un electron și un foton care se mișcă în sensuri opuse, unul spre altul. Deodată – la momentul  $T_3$  – fotonul se transformă în două particule, un pozitron și un electron. Pozitronul nu dăinuiește prea mult: el se ciocnește în scurt timp – la momentul  $T_5$  – de un electron, anihilându-se reciproc și dând naștere unui nou foton. În acest timp, electronul creat anterior de către fotonul original își continuă drumul prin spațiotimp.

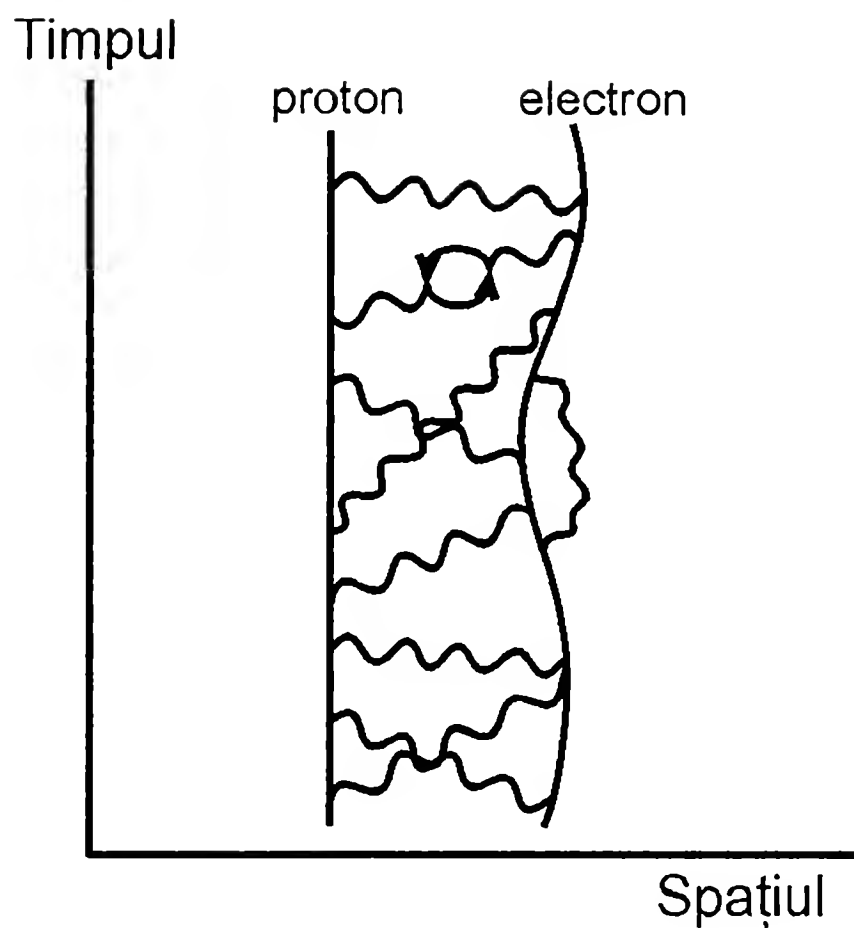
Următorul lucru despre care aș dori să vorbesc este electronul în cadrul unui atom. Pentru a înțelege comportarea electronilor în atomi, trebuie să adăugăm încă un aspect, și anume nucleul – partea masivă situată în centrul atomului, care conține cel puțin un proton (protonul constituie o „Cutie a Pandorei“, pe care o vom deschide în prelegerea următoare). În această prelegere nu vă voi oferi legile exacte ale comportării nucleului; ele sunt foarte complicate. Însă, în cazul de față, în care nucleul stă liniștit, putem aproxima comportarea lui cu cea a unei particule cu o anumită amplitudine de a se deplasa dintr-un loc în altul în spațiotimp, dată de expresia  $E$ (de la A la B), dar în care  $n$ -ul ia o valoare mult mai mare. Cum nucleul este extrem de greu în comparație cu electronul, putem în cazul de față să tratăm problema considerând că în esență el stă pe loc, în vreme ce se deplasează în timp.

Cel mai simplu atom, numit hidrogen, înseamnă un proton și un electron. Schimbând fotoni, protonul menține electronul în preajmă, dansând în jurul său (a se vedea Figura 65).<sup>9</sup> Atomii care conțin mai mulți protoni și un număr corespunzător de electroni, împrăstie și ei

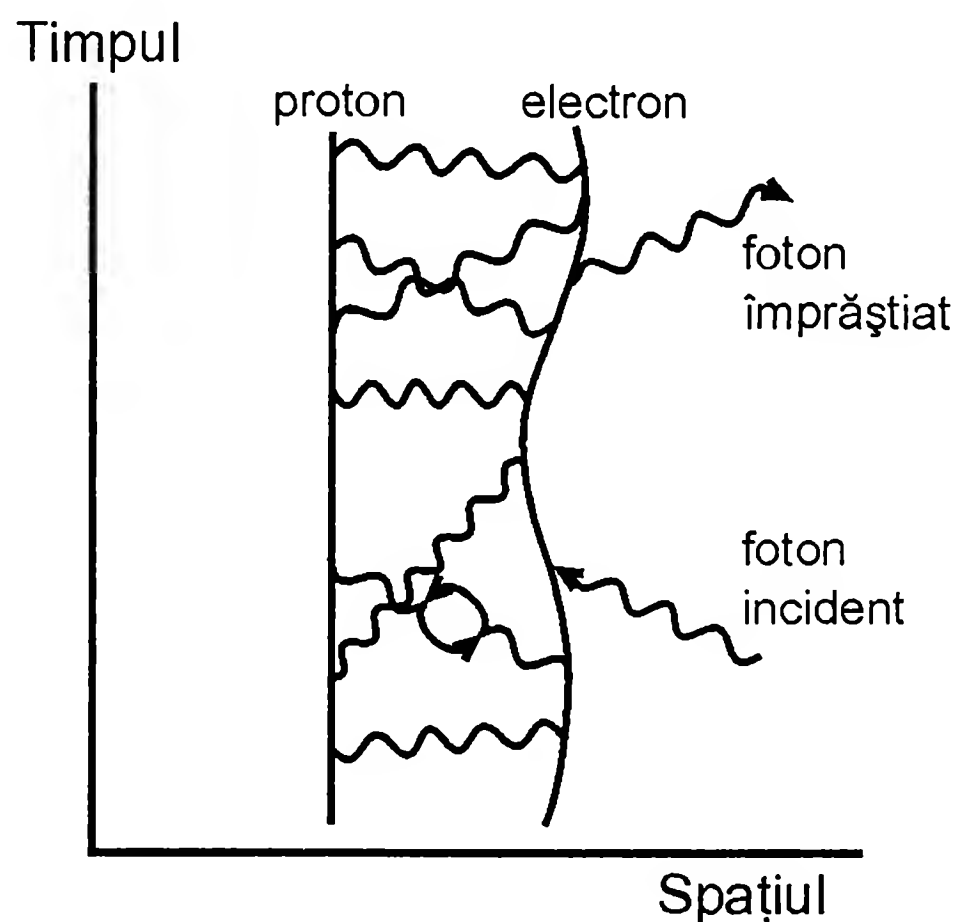
---

<sup>9</sup> Amplitudinea pentru schimbul de fotoni este  $(-j) \times F(\text{de la A la B}) \times j$  – două cuplări plus amplitudinea ca un foton să se deplaseze dintr-un loc în altul. Amplitudinea protonului de a se cupla cu un foton este  $-j$ .





**Figura 65.** Un electron este menținut într-o anumită plajă de distanțe față de nucleul unui atom, prin schimb de fotoni cu un proton (o „Cutie a Pandorei“ în care ne vom uita în Capitolul 4). Pentru moment, protonul poate fi aproximat cu o particulă staționară. Pe desen este reprezentat un atom de hidrogen, alcătuit dintr-un proton și un electron, care schimbă fotoni între ei.



**Figura 66.** Fenomenul care dă socoteală de reflexia parțială pe o lamă de sticlă este împrăștierea luminii pe un electron din atom. Desenul prezintă o modalitate în care s-ar putea petrece acest eveniment în cazul unui atom de hidrogen.

lumina (atomii din aer împrăştie lumina Soarelui şi fac prin aceasta ca cerul să fie albastru), dar diagramele pentru aceşti atomi ar implica atât de multe linii drepte şi ondulate, încât nu s-ar mai înţelege absolut nimic!

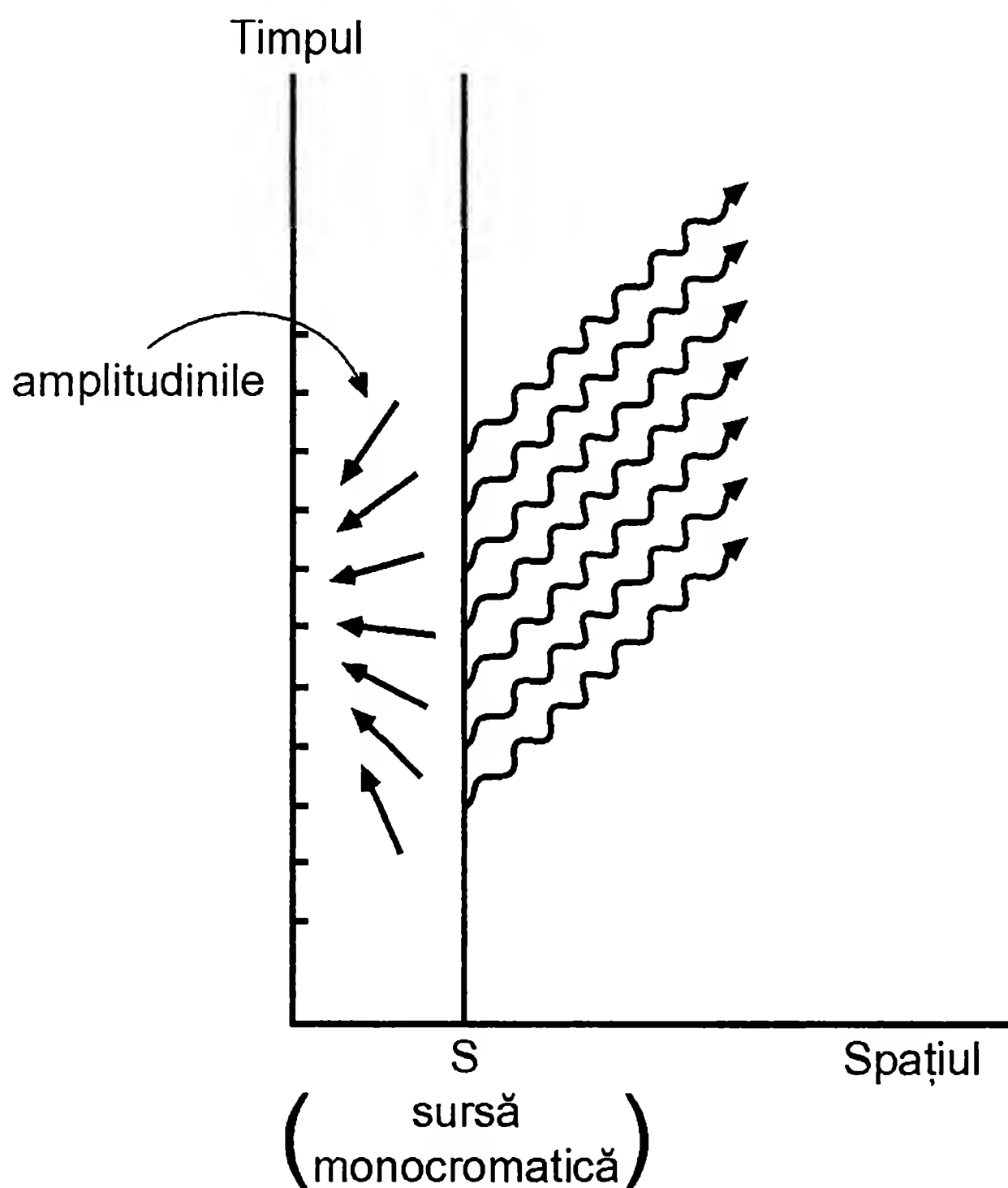
Aş dori acum să vă prezint diagrama pentru un electron dintr-un atom de hidrogen, care împrăştie lumina (a se vedea Figura 66). În timp ce electronul şi nucleul schimbă fotoni, un foton vine din exteriorul atomului şi este absorbit; apoi, un nou foton este emis. (Ca de obicei, există şi alte posibilităţi care trebuie luate în considerare, cum ar fi aceea ca noul foton să fie emis înainte de absorbirea celui vechi.) Amplitudinea totală corespunzătoare tuturor modurilor în care un electron poate împrăştia un foton poate fi sumarizată ca o singură săgeată, ca o anumită cantitate de contracţie şi rotire. (Vom nota ceva mai încolo această săgeată cu „Î“.) Mărimea aceasta depinde de nucleu şi de modul în care sunt aranjaţi electronii în atom, şi este diferită pentru diferite materiale.

Acuma, haideţi să urmărim din nou reflexia parţială a luminii pe o lamă de sticlă. Cum are ea loc? Eu m-am referit la lumină ca reflectându-se pe faţa superioară şi pe faţa inferioară. Conceptul de suprafaţă a reprezentat o simplificare, pe care am făcut-o cu scopul de a menţine la început lucrurile simple. Lumina nu este propriu-zis afectată de suprafeţe. Un foton incident este împrăştiat de electronii atomilor din interiorul sticlei, iar la detector urcă înapoi un foton *nou*. Este interesant faptul că, în loc să adunăm toate miliardele de săgetuţe minuscule ce reprezintă amplitudinea ca toţi electronii din interiorul sticlei să împrăştie fotonul incident, noi putem aduna doar două săgeţi – una pentru reflexia pe „faţa superioară” şi una pentru reflexia pe „faţa inferioară” – şi obţine acelaşi rezultat. Haideţi să vedem de ce.

Pentru a discuta din noua perspectivă reflexia luminii pe o lamă de sticlă, trebuie să luăm în considerare dimensiunea timpului. Mai înainte, atunci când am vorbit despre lumina de la o sursă monocromatică, am făcut uz de un cronometru imaginar care să măsoare timpul de mişcare al unui foton – acul cronometrului determina acolo unghiul amplitudinii corespunzătoare unui anumit drum. În formula pentru  $F(\text{de la } A \text{ la } B)$  (amplitudinea ca un foton să se deplaseze dintr-un punct în altul) nu se menţionează despre nicio rotire. Ce s-a întâmplat cu cronometrul? Ce s-a întâmplat cu rotirea?

În prima prelegere am afirmat doar că sursa de lumină era monocromatică. Pentru a analiza în mod corect reflexia luminii pe o lamă de sticlă, trebuie să ştim mai multe despre sursa de lumină monocromatică. În general, amplitudinea ca o sursă să emită un foton variază cu *timpul*: pe măsura trecerii timpului, unghiul amplitudinii pentru

emiterea unui foton de către sursă variază. O sursă de lumină albă – multe culori amestecate – emite fotoni într-o manieră haotică: unghiul amplitudinii se modifică brusc și neregulat, după toane. Însă atunci când construim o sursă *monocromatică*, realizăm un dispozitiv care a fost atent potrivit pentru ca amplitudinea de emiterie a unui foton la un anumit moment de timp să fie ușor calculabilă: ea își modifică unghiul cu viteză *constantă*, asemenea acului unui cronometru. (De fapt, această săgeată se rotește cu aceeași viteză ca acul cronometrului utilizat anterior, dar în sens opus – a se vedea Figura 67.)



**Figura 67.** O sursă monocromatică este un aparat minunat construit, care emite fotoni de o manieră foarte predictibilă: pe măsura trecerii timpului, amplitudinea de emiterie a unui foton la un anumit *moment de timp* se rotește în sens invers acelor de ceasornic. Astfel, amplitudinea ca sursa să emită un foton la un moment de timp de mai târziu are un unghi mai mic. Se va admite că toată lumina emisă de sursă se propagă cu viteza  $c$  (întrucât distanțele sunt mari).

Viteza de rotație depinde de culoarea luminii: amplitudinea pentru o sursă albastră se rotește de aproape două ori mai repede decât cea pentru o sursă roșie, exact ca mai înainte. Deci, contorul folosit de noi drept „cronometru imaginar” era sursa monocromatică: în realitate, unghiul corespunzător amplitudinii pentru un drum dat depinde de *momentul* la care fotonul este emis de sursă.

Odată fotonul emis, nu mai există vreo rotire ulterioară a săgeții în timpul deplasării fotonului dintr-un punct în altul în spațiu-timp. Chiar dacă expresia  $F(\text{de la } A \text{ la } B)$  ne spune că există o amplitudine ca lumina să se propage dintr-un loc în altul cu viteze *altele* decât  $c$ , în experimentul nostru distanța de la sursă la detector este relativ mare (în comparație cu un atom) și deci singura contribuție nenulă care să conteze la lungimea lui  $F(\text{de la } A \text{ la } B)$  vine din partea lui  $c$ .

Ca punct de plecare în noul nostru calcul pentru reflexia parțială, haideți să începem prin a defini complet evenimentul: detectorul din punctul A clicăie la un anumit *moment de timp*  $T$ . Apoi haideți să împărțim stratul de sticlă într-un număr de secțiuni foarte subțiri – să zicem, șase (a se vedea Figura 68(a)). Din analiza făcută în cea de-a doua prelegere, în care am găsit că aproape întreaga lumină este reflectată de mijlocul oglinzii, știm că, deși fiecare electron împrăștie lumina în toate direcțiile, atunci când se adună toate săgețile pentru o secțiune dată, singurul loc în care ele nu se anulează reciproc este acolo unde lumina coboară drept în jos, în mijlocul secțiunii, și se împrăștie în una din următoarele două direcții: drept în sus, înapoi la detector, sau drept în jos, prin sticlă. Ca atare, săgeata finală corespunzătoare evenimentului, se va determina prin adunarea celor șase săgeți reprezentând împrăștierea luminii pe cele șase puncte din mijloc – de la  $X_1$  la  $X_6$  – așezate vertical de-a lungul grosimii lamei.

În regulă; haideți să calculăm săgeata pentru fiecare din cele șase moduri în care s-ar putea propaga lumina – via cele șase puncte, de la  $X_1$  la  $X_6$ . În fiecare astfel de modalitate sunt implicați patru pași (ceea ce înseamnă că se vor înmulți patru săgeți):

PASUL nr. 1: Un foton este emis de sursă la un anumit moment de timp dat.

PASUL nr. 2: Fotonul se deplasează de la sursă la unul din punctele din sticlă.

PASUL nr. 3: În acel punct fotonul este împrăștiat de un electron.

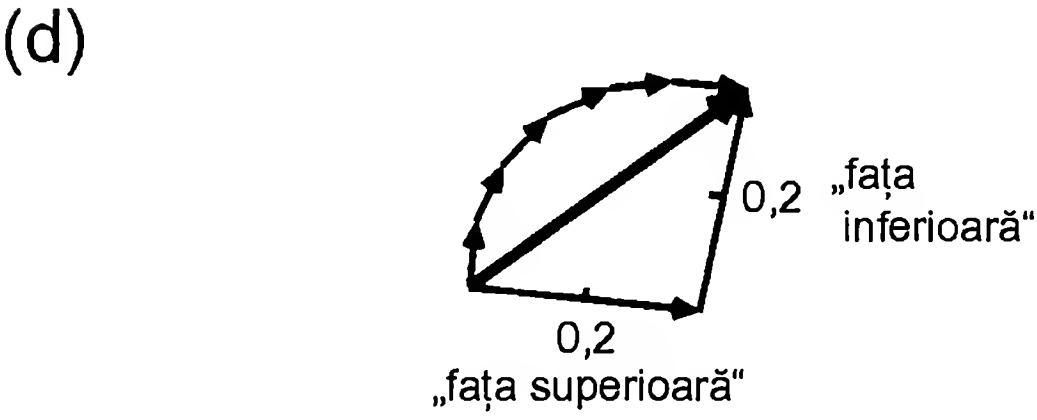
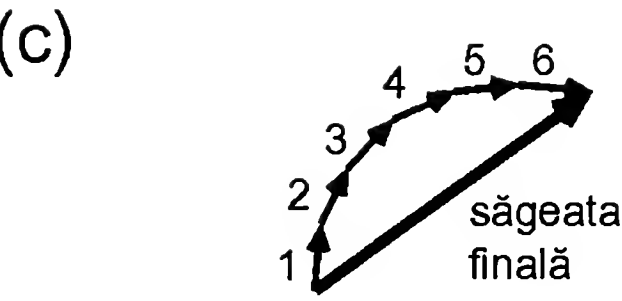
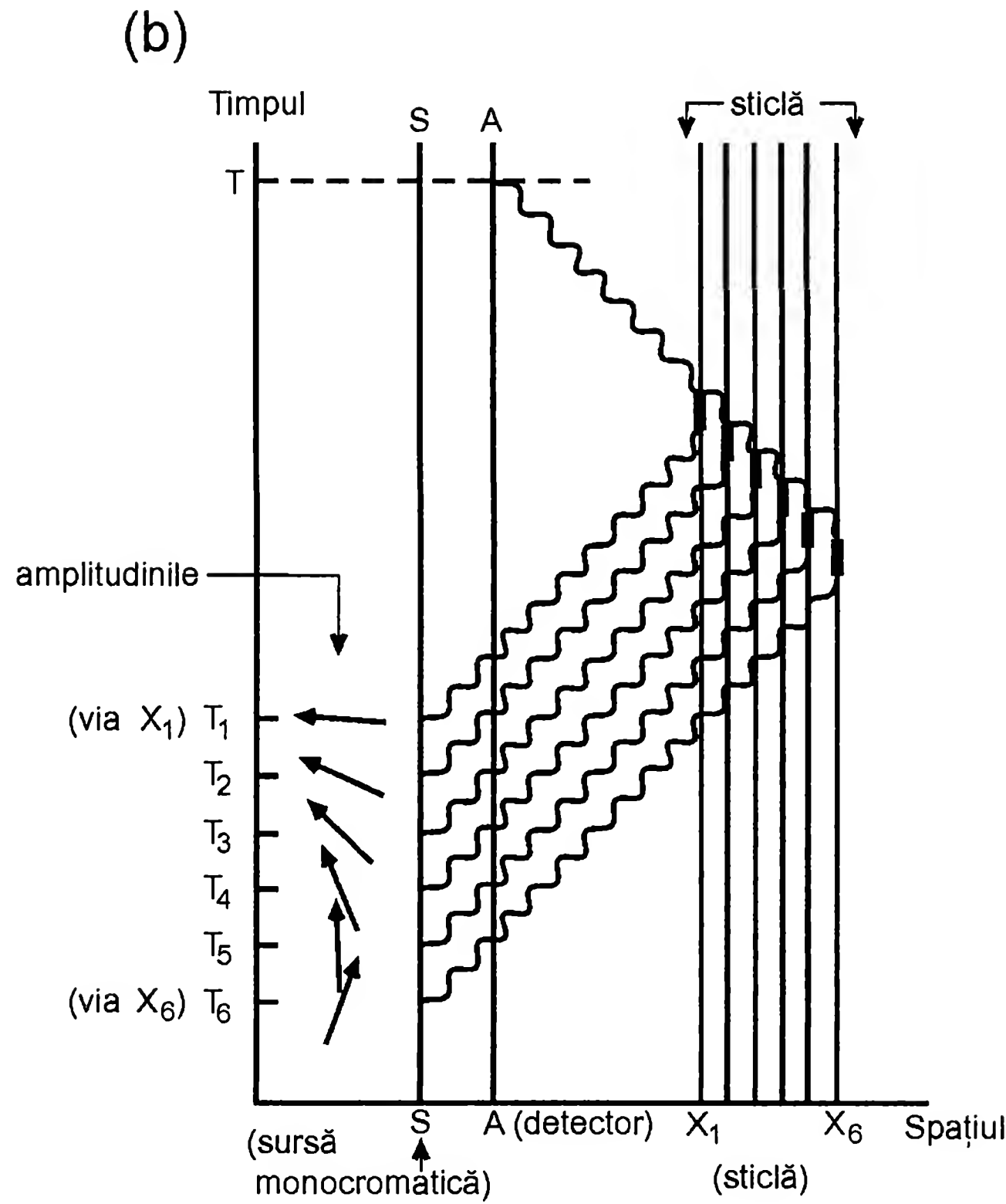
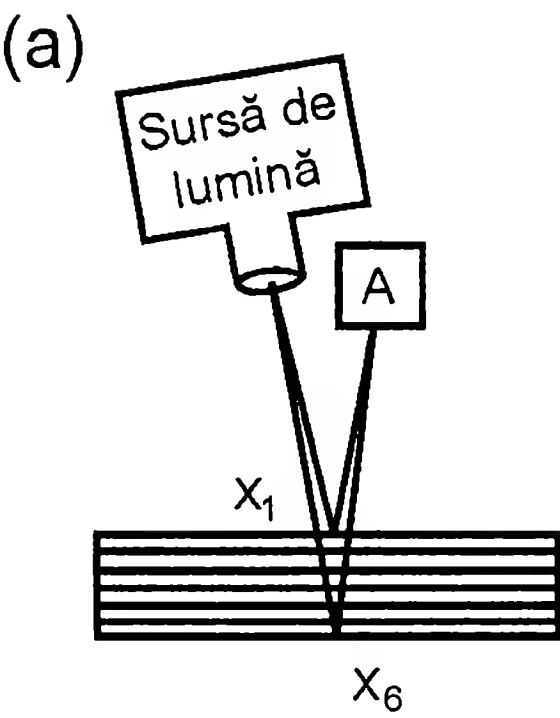
PASUL nr. 4: Un nou foton urcă până la detector.

Vom afirma că amplitudinile pentru pașii 2 și 4 (un foton se deplasează înspre sau dinspre un punct din sticlă) nu implică nicio contracție ori rotire, deoarece putem presupune că niciun pic de lumină nu se rătăcește sau nu se răspândește între sursă și sticlă sau între sticlă și detector. Pentru pasul 3 (un electron împrășteie un foton), amplitudinea corespunzătoare împrăstierii reprezintă o constantă – o contracție și o rotire cu o anumită cantitate,  $\hat{I}$  – și este aceeași oriunde în sticlă. (Această mărime este, așa cum am menționat mai înainte, diferită pentru diferite materiale. Pentru sticlă, rotirea lui  $\hat{I}$  este de  $90^\circ$ .) În consecință, din cele patru săgeți de înmulțit, doar săgeata pentru pasul 1 – amplitudinea corespunzătoare emiterii unui foton de către sursă la un anumit moment de timp – diferă de la o variantă la alta.

Momentul de timp la care ar trebui emis un foton pentru a ajunge la detector la momentul  $T$  (a se vedea Figura 68(b)) nu este același pentru cele șase diferite drumuri. Un foton împrăștiat de  $X_2$  va fi trebuit emis un pic *mai devreme* decât unul împrăștiat de  $X_1$ , pentru că drumul este mai lung. Ca atare, săgeata de la momentul  $T_2$  este un pic mai rotită decât cea de la  $T_1$ , deoarece amplitudinea ca o sursă monocromatică să emită un foton la un anumit moment de timp, se rotește în sens invers acelor de ceasornic odată cu trecerea timpului. Același lucru este valabil pentru fiecare din săgeți, până la ultima, de la  $T_6$ : toate cele șase săgeți au aceeași lungime, dar sunt rotite cu diferite unghiuri – adică, sunt orientate în diferite direcții – din cauză că ele reprezintă un foton emis de sursă la momente de timp diferite.

După contracția săgeții de la momentul  $T_1$  cu cantitățile prevăzute pentru pașii 2, 3 și 4 – și după rotirea ei cu  $90^\circ$ , prevăzută pentru pasul 3 – obținem săgeata 1 (a se vedea Figura 68(c)). Același lucru este valabil și pentru săgețile 2-6. Astfel, săgețile 1 până la 6 au aceeași lungime (contractată) și sunt rotite una în raport cu alta cu exact aceleași cantități ca și săgețile de plecare, de la momentele  $T_1$  până la  $T_6$ .

În continuare, adunăm săgețile 1-6. Punând săgețile în ordine de la 1 la 6, obținem ceva asemănător unui arc de cerc. Săgeata finală este dată de coarda acestui arc. Lungimea săgeții finale crește cu grosimea sticlei – un strat mai gros înseamnă mai multe secțiuni, deci mai multe săgeți, deci un arc de cerc mai mare... până când se ajunge la un semicerc (și săgeata finală este diametrul lui). După aceea, pe măsură ce grosimea sticlei continuă să crească, lungimea săgeții finale *descrește* și cercul devine întreg, ciclul repetându-se. Pătratul acestei lungimi reprezintă probabilitatea evenimentului, și ea variază într-un ciclu de la zero la 16%.



**Figura 68.** Ne începem noua analiză a reflexiei parțiale împărțind un strat de sticlă într-un anumit număr de secțiuni (în cazul de față, șase) și urmărind diferitele moduri în care lumina s-ar putea propaga de la sursă la sticlă și înapoi la detectorul din A. Singurele puncte importante din sticlă (unde amplitudinea corespunzătoare împrăstierii luminii nu se anulează) sunt localizate la mijlocul fiecărei secțiuni; în desenul (a) sunt prezentate punctele de la  $X_1$  la  $X_6$ , așa cum sunt poziționate ele fizic în interiorul sticlei, iar în desenul (b) ele sunt reprezentate ca linii verticale pe diagrama spațiu-timp. Evenimentul a cărui probabilitate o calculăm este: detectorul clicăie la un anumit moment de timp  $T$ . Astfel, el ne apare pe diagrama spațiu-timp ca un punct (intersecția lui A cu  $T$ ).

Pentru fiecare din modalitățile în care se poate petrece evenimentul, trebuie să aibă loc patru pași succesivi, deci trebuie să înmulțim patru săgeți. Pașii sunt prezentați în desenul (b): 1) un foton părăsește sursa la un anumit moment de timp (săgețile din dreptul momentelor  $T_1$  până la  $T_6$  reprezintă amplitudinile de emitere pentru cele șase momente diferite); 2) fotonul se deplasează de la sursă la unul din punctele din sticlă (cele șase alternative sunt reprezentate sub formă de linii ondulate orientate către colțul din dreapta-sus); 3) un electron situat în dreptul unuia din acele puncte împrășteie un foton (reprezentat sub forma unei scurte linii groase verticale); 4) un foton nou se deplasează către detector și ajunge la ora fixată,  $T$  (reprezentat ca o linie ondulată orientată către colțul din stânga-sus). Amplitudinile pentru pașii 2, 3 și 4 sunt la fel pentru toate cele șase variante, în vreme ce pentru pasul 1 amplitudinea diferă: în comparație cu un foton împrăștiat de un electron aflat în partea de sus a sticlei (în punctul  $X_1$ ), un foton împrăștiat mai în adâncimea sticlei – de pildă, în punctul  $X_2$  – trebuie să părăsească sursa ceva mai devreme, la momentul  $T_2$ .

După ce terminăm de înmulțit cele patru săgeți pentru fiecare variantă, săgețile rezultate, reprezentate în desenul (c), sunt mai scurte decât cele din desenul (b); iar fiecare din ele a fost rotită cu  $90^\circ$  (potrivit caracteristicii împrăstierii fotonilor pe electroni în sticlă). Atunci când aceste șase săgeți sunt adunate în ordinea dată, ele formează un arc de cerc; coarda corespunzătoare acestui arc reprezintă săgeata finală. Aceeași săgeată finală poate fi obținută trasând două raze vectoare, reprezentate în desenul (d), și „scăzându-le” (adică, inversând sensul săgeții corespunzătoare „feței superioare” și adunând-o pe aceasta cu cea corespunzătoare „feței inferioare”). Această scurtătură a fost folosită ca simplificare în prima prelegere.



Există o șmecherie matematică pe care o putem utiliza pentru a obține același rezultat (a se vedea Figura 68(d)): dacă trasăm din centrul „cercului” o săgeată până în coada săgeții 1 și alta până în vârful săgeții 6, obținem două raze vectoriale. Dacă pe prima dintre acestea o răsucim cu  $180^\circ$  (o „scădem”), atunci, prin compunerea ei cu cealaltă, obținem săgeata finală! Asta făceam în prima noastră prelegere: aceste două raze constituie săgețile despre care spuneam că reprezintă reflexiile pe „fața superioară” și pe „fața inferioară”. Ambele au faimoasa lungime 0,2.<sup>10</sup>

Așadar, putem obține rezultatul corect pentru probabilitatea de reflexie parțială, închipuindu-ne (în mod fals) că toată reflexia provine numai de pe fețele superioară și inferioară. În această analiză ușoară din punct de vedere intuitiv, săgețile corespunzătoare „feței superioare” și „feței inferioare” constituie simple construcții matematice care ne conduc la răspunsul corect, pe când analiza pe care tocmai am făcut-o – cu diagrame spațiu-timp și săgeți care formează un arc de cerc – constituie o reprezentare mai corectă a ceea ce se întâmplă de fapt: reflexia parțială reprezintă împrăștierea luminii pe electronii *din interiorul* sticlei.

Acuma, cum rămâne treaba cu lumina care trece *prin* stratul de sticlă? În primul rând, există o amplitudine ca fotonul să treacă drept prin sticlă, fără să ciocnească vreun electron (a se vedea Figura 69(a)). Ca lungime, săgeata acesteia este cea mai importantă. Dar mai există alte șase moduri în care un foton ar putea ajunge la detectorul de sub sticlă: el ar putea să lovească un electron în  $X_1$ , iar noul foton să se împrășteie drept în jos, spre B; sau ar putea lovi un electron în  $X_2$ , iar noul foton să se împrășteie drept în jos, spre B; și așa mai departe. Aceste șase săgeți au fiecare aceeași lungime ca săgețile care au format „arcul de cerc” din exemplul anterior: valoarea acestei lungimi are la bază aceeași amplitudine ca un electron din sticlă să împrășteie un

---

<sup>10</sup> În mod evident, raza arcului de cerc depinde de *lungimea* săgeților corespunzătoare fiecărei secțiuni, care, în ultimă instanță, este determinată de amplitudinea  $\hat{I}$  ca un electron dintr-un atom de sticlă să împrășteie un foton. Această rază poate fi calculată aplicând multitudinii de schimburi de fotoni implicate, formulele pentru cele trei acțiuni de bază, și sumând amplitudinile corespunzătoare. Este o problemă foarte dificilă, dar, pentru substanțe relativ simple, raza a fost calculată cu un considerabil succes, iar variația razei de la substanță la substanță este destul de bine înțeleasă pe baza acestor idei ale electrodinamicii cuantice. Totuși, trebuie spus că pentru o substanță atât de complexă precum sticla, nu s-au efectuat nicidecum calculele directe pornind de la principiile de bază. În astfel de cazuri, raza se determină experimental. Pentru sticlă, s-a găsit pe cale experimentală că raza este aproximativ 0,2 (în cazul în care lumina cade drept pe sticlă, la  $90^\circ$ ).

foton, Î. Numai că, de această dată, toate cele șase săgeți sunt orientate în aceeași direcție, deoarece lungimile tuturor celor șase drumuri care implică o împrăștiere sunt egale. Pentru substanțe transparente precum sticla, direcția acestor săgeți minuscule este perpendiculară pe săgeata principală. Atunci când adunăm săgeata principală și săgețile minuscule, obținem o săgeată finală care are esențialmente aceeași lungime cu săgeata principală, dar este puțin rotită pe altă direcție. Cu cât sticla este mai groasă, cu atât sunt mai multe săgeți minore, și cu atât mai rotită este săgeata finală. Așa funcționează propriu-zis o lentilă convergentă: punând în calea drumurilor mai scurte ale luminii grosimi ceva mai mari ale sticlei, putem face ca săgețile finale să fie orientate în aceeași direcție pentru toate drumurile posibile.

Același efect ar apărea și dacă fotonii s-ar deplasa mai încet prin sticlă decât prin aer: am avea o rotire suplimentară a săgeții finale. Acesta este motivul pentru care am afirmat mai devreme că lumina ne apare ca propagându-se mai lent prin sticlă (ori prin apă) decât prin aer. În realitate, „încetinirea” luminii reprezintă o rotire suplimentară cauzată de atomii din sticlă (ori din apă) pe care se împrășteie lumina. Măsura în care apare o rotire suplimentară a săgeții finale atunci când lumina se propagă printr-un mediu, se numește „indicele de refracție” al acelui material.<sup>11</sup>

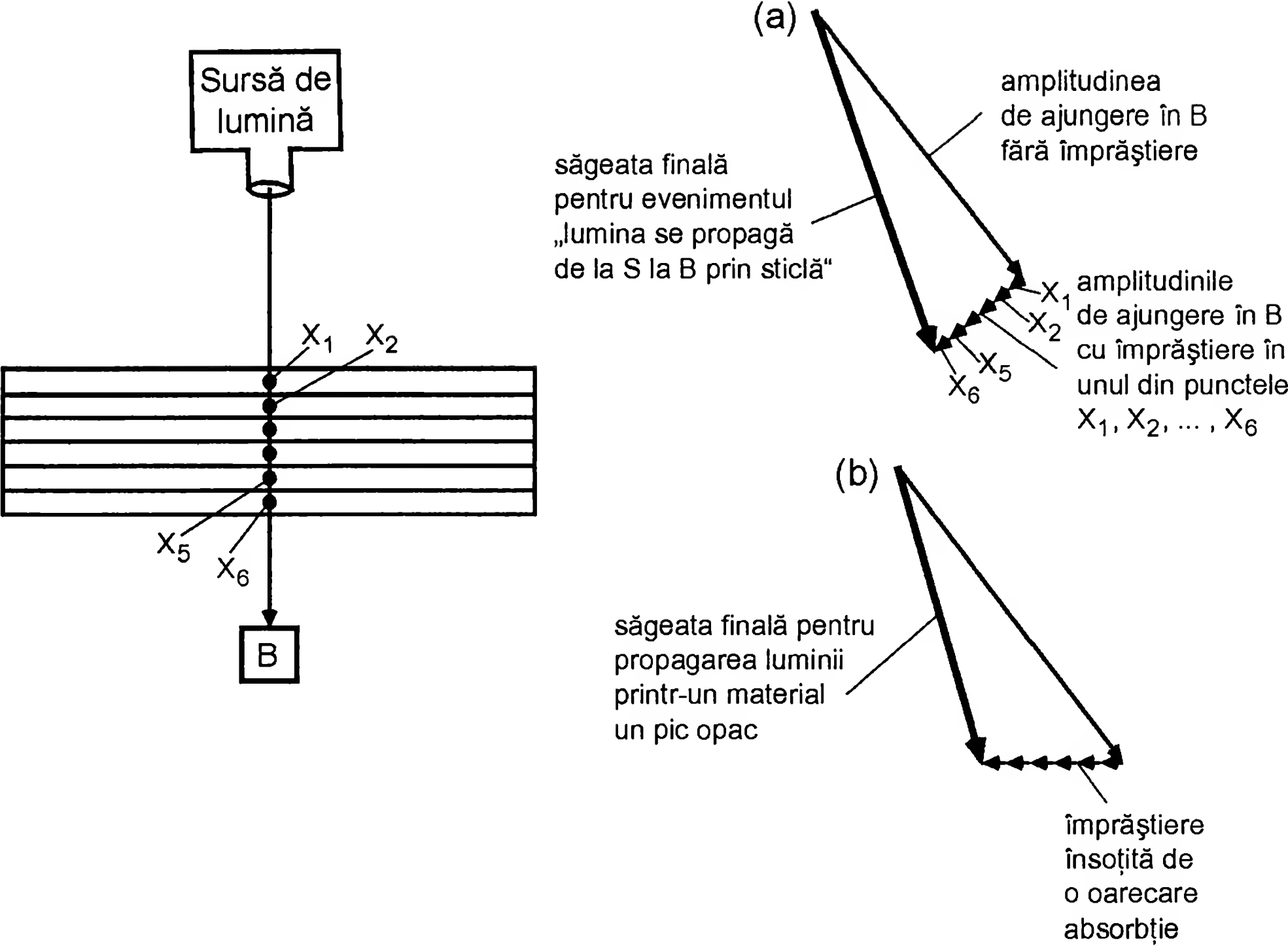
Pentru substanțele care absorb lumină, săgețile minuscule sunt orientate la unghiuri mai mici de  $90^\circ$  față de săgeata principală (a se vedea Figura 69(B)). Aceasta face ca săgeata finală să fie mai scurtă decât săgeata principală, indicând faptul că probabilitatea ca un foton să se deplaseze prin sticlă parțial opacă este mai mică decât prin sticlă transparentă.

Prin urmare, avem că toate fenomenele și numerele arbitrare menționate în primele două prelegeri – cum ar fi amplitudinea de 0,2 pentru reflexia parțială, „încetinirea” luminii prin apă și sticlă, și așa

---

<sup>11</sup> Fiecare din săgețile corespunzătoare reflexiei pe o secțiune (și care formează un „arc de cerc”) au aceeași lungime cu săgețile care fac să se rotească mai mult sau mai puțin săgeata finală pentru transmisie. Prin urmare, există o relație între reflexia parțială pe un material și indicele lui de refracție.

Se vedește că săgeata finală a devenit mai mare ca 1, ceea ce înseamnă că prin sticlă iese mai multă lumină decât intră! Ni se pare așa din cauză că nu am luat în considerare amplitudinile ca un foton să coboare până la una din secțiuni, un foton nou să se împrășteie în sus până la o alta, iar apoi un al treilea foton să se împrășteie din nou în jos prin sticlă – precum și alte multe posibilități complicate – care au ca rezultat curbarea micilor săgeți și menținerea valorii săgeții finale între 0,92 și 1 (deci, probabilitatea totală ca lumina să fie reflectată sau transmisă de lama de sticlă este totdeauna 100%).



**Figura 69.** Amplitudinea cea mai mare pentru lumina care este transmisă printr-o lamă de sticlă către detectorul din punctul B, provine de la acea parte care nu implică nicio împrăștiere pe electronii atomilor din sticlă, parte reprezentată în desenul (a). Acestei săgeți îi adunăm șase mici săgeți care corespund împrăștierii luminii în fiecare din secțiunile reprezentate de punctele  $X_1$ - $X_6$ . Aceste șase săgeți au lungimi egale (deoarece amplitudinea de împrăștiere este aceeași oriunde în sticlă) și sunt orientate în aceeași direcție (pentru că lungimile tuturor drumurilor de la sursă la detectorul din B, via oricare din punctele X, sunt egale). După adunarea săgeții mari și a celor mici, găsim că săgeata finală pentru transmisia luminii printr-o lamă de sticlă este rotită ceva mai mult decât ne-am fi așteptat dacă lumina ar fi trecut doar direct, fără împrăștiere. Acesta este motivul pentru care nouă ne apare că luminii îi ia mai mult timp să se propage prin sticlă decât prin vid ori prin aer. Cantitatea cu care se rotește săgeata finală din cauza electronilor din interiorul unui material se numește „indice de refracție“.

Pentru medii transparente, micile săgeți sunt perpendiculare pe săgeata principală (de fapt, atunci când luăm în considerare și împrăștierile duble ori triple, ele se curbează un pic, împiedicând săgeata finală să devină mai mare decât săgeata principală: Natura a aranjat în toate situațiile lucrurile astfel încât să nu obținem niciodată mai multă lumină decât s-a emis. Pentru materiale parțial opace – care absorb într-o oarecare măsură lumina – săgețile mici sunt orientate mai înspre săgeata principală, rezultând astfel o săgeată finală sensibil mai scurtă decât era de așteptat, reprezentată în desenul (b). Această săgeată finală mai scurtă corespunde unei probabilități mai mici ca un foton să fie transmis printr-un material parțial opac.

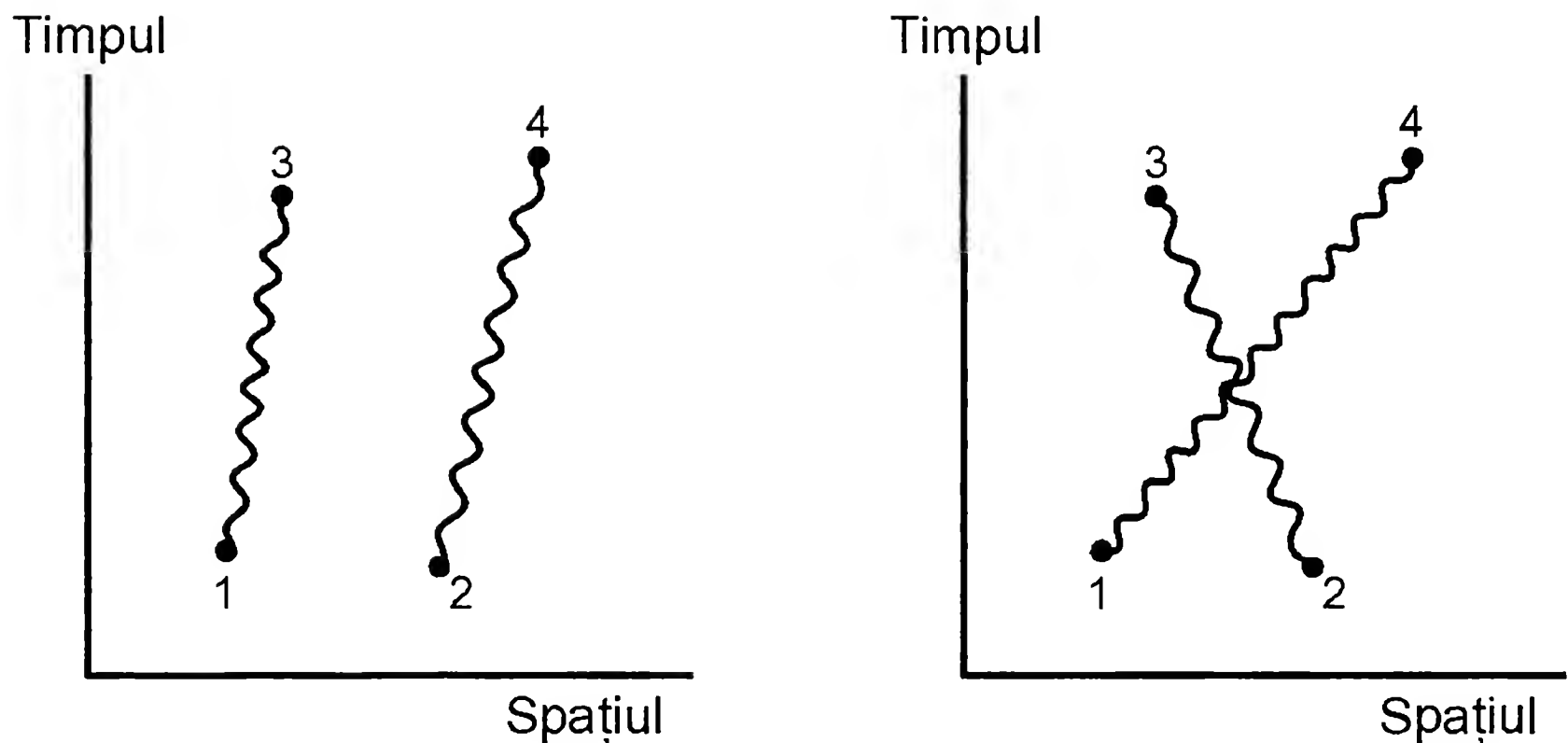
mai departe – sunt explicate mai în amănunt de doar cele trei acțiuni de bază – trei acțiuni care, în fapt, explică de asemenea și aproape orice altceva.

Este greu de crezut că aproape întreaga vastă varietate vizibilă în natură rezultă din monotonia combinării repetate a doar acestor trei acțiuni de bază. Dar așa este. Voi scoate un pic în evidență modul în care apare această varietate.

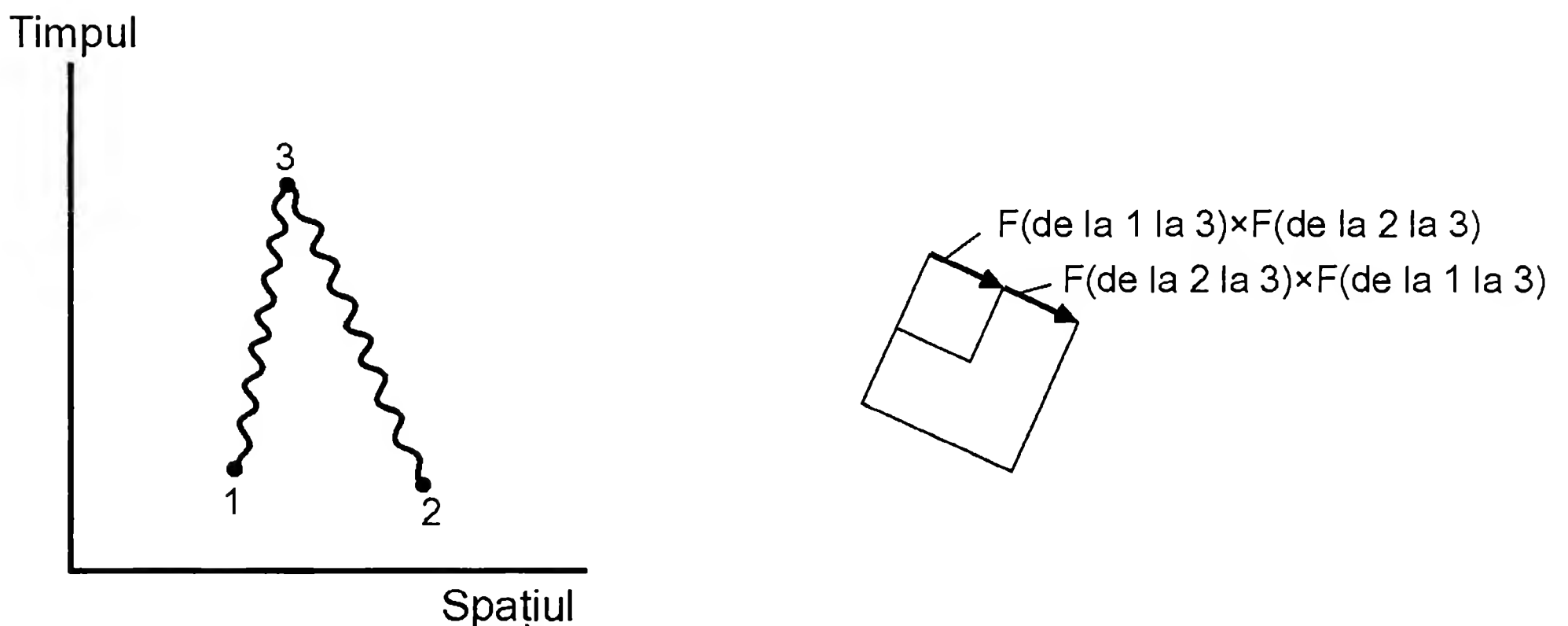
Am putea începe cu fotonii (a se vedea Figura 70). Care este probabilitatea ca doi fotoni, aflați în punctele 1 și 2 în spațiotimp, să ajungă la doi detectori, situați în punctele 3 și 4? Există două maniere principale în care s-ar putea petrece acest eveniment, și fiecare depinde de două lucruri care să se întâmple concomitent: fotonii ar putea să se ducă direct –  $F(\text{de la 1 la 3}) \times F(\text{de la 2 la 4})$  – sau ar putea să se „intersecteze” –  $F(\text{de la 1 la 4}) \times F(\text{de la 2 la 3})$ . Amplitudinile rezultante pentru aceste două posibilități se adună și se produce interferență (după cum am văzut în a doua prelegere), făcând ca lungimea săgeții finale să varieze în funcție de poziția relativă a punctelor în spațiotimp.

Și dacă am face ca punctele 3 și 4 să coincidă în spațiotimp (a se vedea Figura 71)? Haideți să zicem că ambii fotoni sfârșesc în punctul 3, și să vedem cum afectează acest lucru probabilitatea evenimentului. Avem acum  $F(\text{de la 1 la 3}) \times F(\text{de la 2 la 3})$  și respectiv  $F(\text{de la 2 la 3}) \times F(\text{de la 1 la 3})$ , ceea ce conduce la două săgeți identice. Atunci când le adunăm, suma lor este dublul lungimii fiecăreia din ele, și produce o săgeată finală al cărei pătrat este de patru ori mai mare decât cel al fiecăreia săgeți luate individual. Din cauza faptului că cele două săgeți sunt identice, ele sunt întotdeauna „aliniat”. Cu alte cuvinte, interferența nu fluctuează în raport cu distanța relativă dintre punctele 1 și 2: ea este mereu constructivă. Dacă nu ne-am gândi la interferența mereu constructivă a celor doi fotoni, am crede că, în medie, se obține dublul probabilității. Când colo, tot timpul se obține de patru ori probabilitatea. Atunci când sunt implicați mulți fotoni, această probabilitate mai mare decât ne-am fi așteptat, crește încă și mai mult.

Acest fapt generează o serie de efecte practice. Putem spune că fotonii tind să ajungă într-o aceeași situație, sau „stare” (felul în care variază în spațiu amplitudinea de a găsi un foton). Șansa ca un atom să emită un foton este amplificată dacă sunt deja prezenți un număr de fotoni (într-o stare în care atomul respectiv să-i fi putând emite). Acest fenomen de „emisie stimulată” a fost descoperit de Einstein atunci când, propunând pentru lumină modelul fotonilor, a deschis calea teoriei cuantice. Laserul funcționează pe baza acestui fenomen.



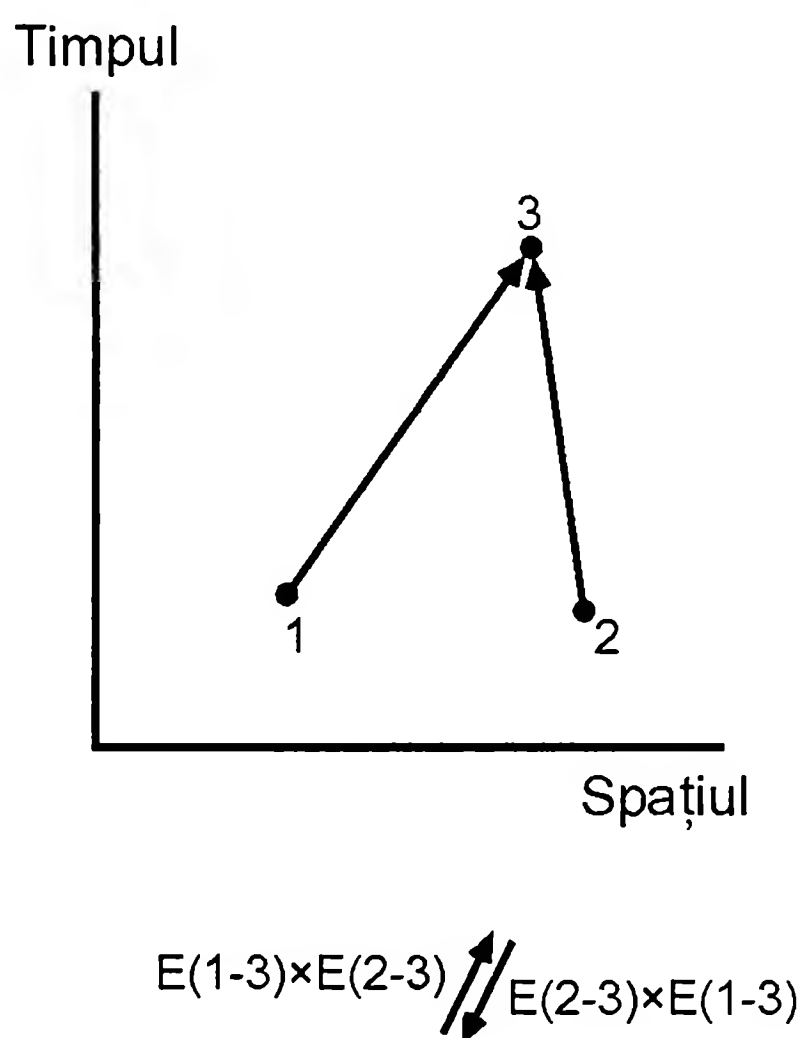
**Figura 70.** Fotonii din punctele 1 și 2 în spațiotimp au o anumită probabilitate de a ajunge în punctele 3 și 4, ce poate fi aproximată prin considerarea celor două modalități principale de petrecere a evenimentului, reprezentate mai sus:  $F(\text{de la } 1 \text{ la } 3) \times F(\text{de la } 2 \text{ la } 4)$  și respectiv  $F(\text{de la } 1 \text{ la } 4) \times F(\text{de la } 2 \text{ la } 3)$ . În funcție de poziția relativă a punctelor 1, 2, 3 și 4, avem diferite grade de interferență.



**Figura 71.** Atunci când punctele 3 și 4 sunt făcute să coincidă, cele două săgeți corespunzătoare –  $F(\text{de la } 1 \text{ la } 3) \times F(\text{de la } 2 \text{ la } 3)$  și respectiv  $F(\text{de la } 2 \text{ la } 3) \times F(\text{de la } 1 \text{ la } 3)$  – au lungimi și orientări identice. Atunci când le adunăm, ele se „aliniază” întotdeauna, formând o săgeată cu lungime dublă față de a fiecăreia separat, și un pătrat de patru ori mai mare. Așadar, fotonii tind să se ducă în același punct din spațiotimp. Acest efect este amplificat încă și mai mult atunci când sunt mai mulți fotoni. El constituie baza modului de funcționare a laserului.

Dacă am face același raționament asupra electronilor noștri falși, cu spin 0, am ajunge la aceeași concluzie. Însă în lumea reală, în care electronii sunt polarizați, se întâmplă ceva total diferit: cele două săgeți,  $E(\text{de la 1 la 3}) \times E(\text{de la 2 la 4})$  și respectiv  $E(\text{de la 1 la 4}) \times E(\text{de la 2 la 3})$ , se scad – înainte de adunare, una din ele este rotită cu  $180^\circ$ . Atunci când punctele 3 și 4 coincid, cele două săgeți au aceeași lungime și direcție și, ca atare, prin scădere ele se anulează (a se vedea Figura 72). Aceasta înseamnă că electronilor, spre deosebire de fotoni, nu le place să se ducă în același loc; ei se feresc unii de alții ca ciumați – doi electroni cu aceeași polarizare nu se pot afla în același punct în spațiotimp. Acest fapt poartă numele de „Principiul Excluziunii” [cunoscut la noi și ca Principiul lui Pauli (n.t.)].

Acest principiu al excluziunii se dovedește a fi sursa mării varietăți de proprietăți chimice ale atomilor. Un proton schimbând fotoni cu un electron care dansează în jurul său, se numește atom de hidrogen. Doi protoni aflați în același nucleu, schimbând fotoni cu doi electroni



**Figura 72.** Dacă doi electroni (cu aceeași polarizare) încearcă să ajungă în același punct din spațiotimp, interferența este totdeauna distructivă, din cauza efectelor polarizării: cele două săgeți identice –  $E(\text{de la 1 la 3}) \times E(\text{de la 2 la 3})$  și respectiv  $E(\text{de la 2 la 3}) \times E(\text{de la 1 la 3})$  – se scad și dau o săgeată finală de lungime nulă. Aversiunea a doi electroni de a ocupa același loc în spațiotimp se numește „Principiul de Excluziune” și dă socoteală pentru marea varietate de atomi din Univers.

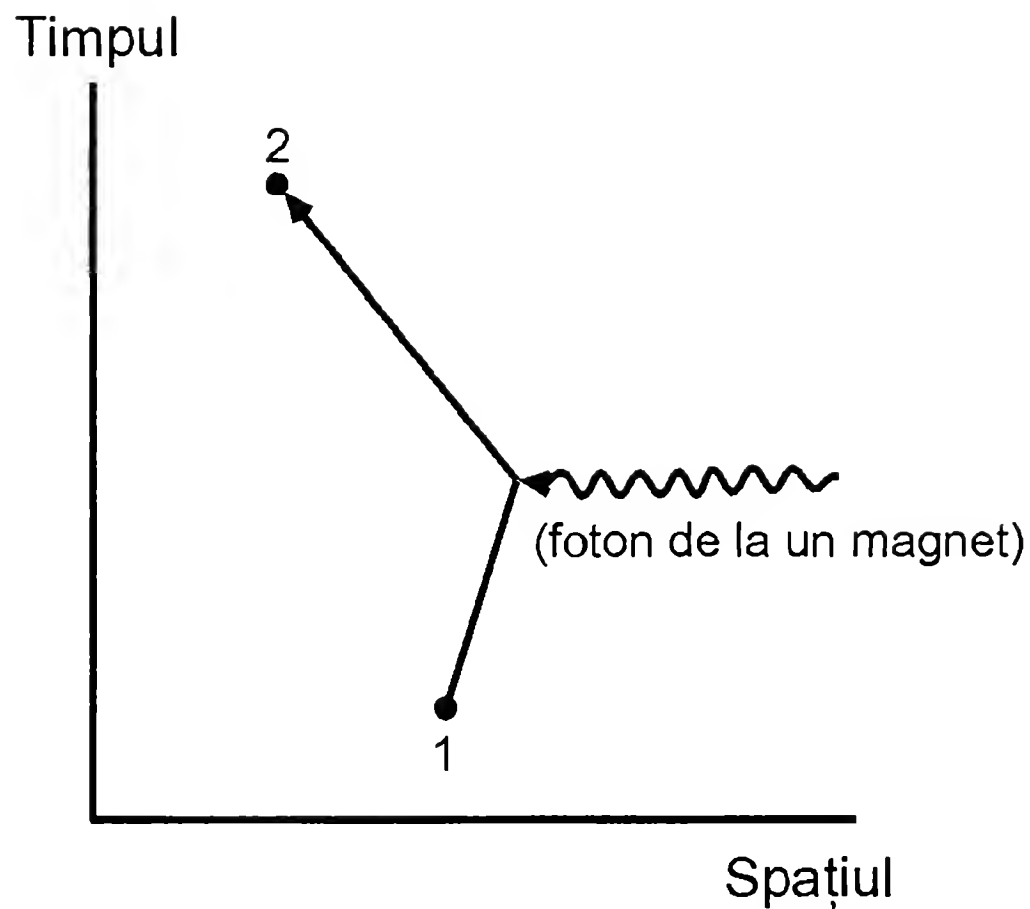


(polarizați în sensuri opuse), se chemă atom de heliu. Vedeți dumneavoastră, chimiștii au un mod al lor complicat de a număra: în loc să spună „unu, doi, trei, patru, cinci protoni“, ei zic „hidrogen, heliu, litiu, beriliu, bor“.

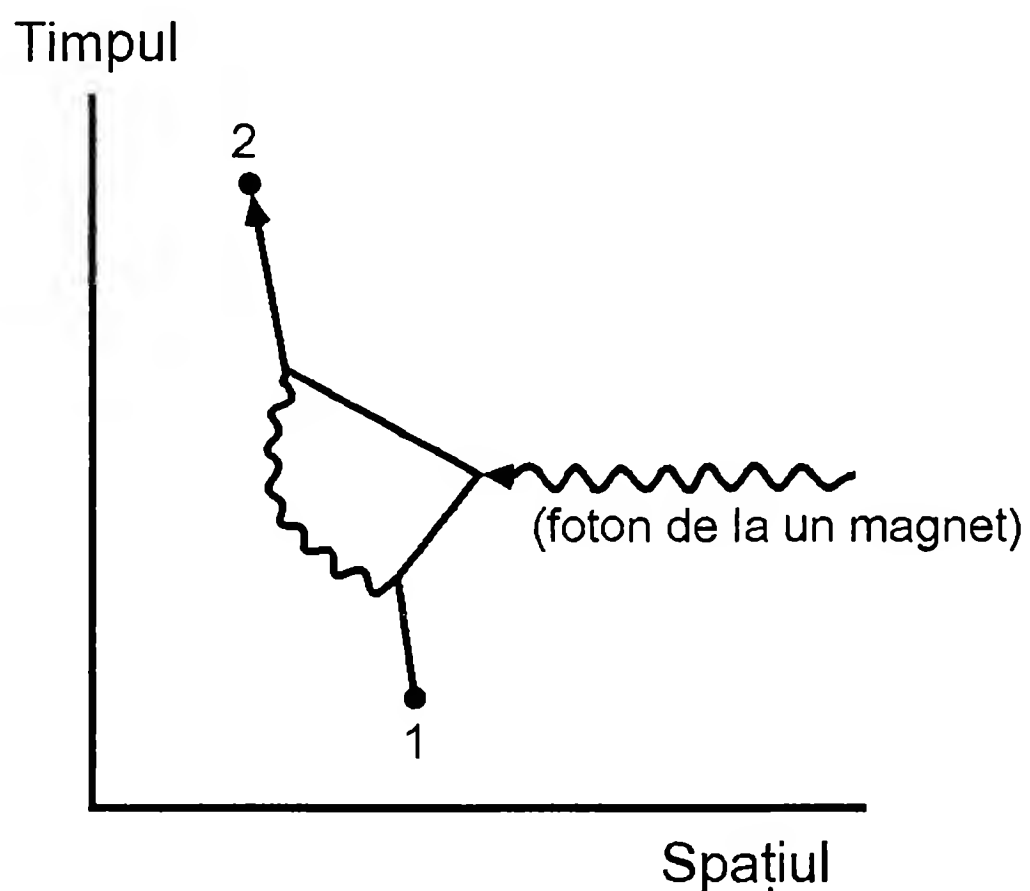
Există doar două stări de polarizare disponibile electronilor, așa încât, într-un atom cu trei protoni în nucleu schimbând fotoni cu trei electroni – o situație numită atom de litiu – al treilea electron este mai depărtat de nucleu decât ceilalți doi (care au ocupat cel mai apropiat spațiu disponibil) și schimbă mai puțini fotoni. Aceasta face ca el să se despartă mai ușor de nucleul său, sub acțiunea fotonilor provenind de la alte nuclee. Un număr uriaș de astfel de atomi apropiați unii de alții, își pierd ușor cel de-al treilea electron al lor, formându-se o mare de electroni ce înoată de la un atom la altul. Această mare de electroni reacționează la orice mică forță electrică (fotoni), generând un curent de electroni – ceea ce descriu eu acum este litiul metalic conducând curentul electric. Atomii de hidrogen și heliu nu își pierd electronii unii în detrimentul altora. Ei sunt „izolatori“.

Toți atomii – mai mult de o sută de tipuri diferite – sunt alcătuiți din câte un anumit număr de protoni ce schimbă fotoni cu un același număr de electroni. Tiparele în care aceștia din urmă se adună în cadrul atomilor sunt complexe, și oferă o enormă varietate de proprietăți: unii atomi sunt metale, alții sunt izolatori, unii sunt gaze, alții sunt cristale; există chestii moi și chestii dure, chestii colorate și chestii transparente – o revărsare colosală de diversitate și animație, care provine din Principiul Excluziunii și din repetarea iar și iar și iar a celor trei foarte simple acțiuni,  $F$ (de la  $A$  la  $B$ ),  $E$ (de la  $A$  la  $B$ ) și  $j$ . (Dacă electronii din lumea aceasta ar fi nepolarizați, toți atomii ar avea proprietăți foarte asemănătoare: electronii s-ar îngrămădi toți laolaltă, aproape de nucleul propriului lor atom, și cu greu ar fi atrași de alți atomi pentru a produce reacții chimice.)

S-ar putea să vă puneți întrebarea cum de niște acțiuni atât de simple pot produce o lume atât de complexă. Este din cauză că fenomenele pe care le vedem în natură sunt rezultatul imensei încâlceli a unui număr nemaipomenit de schimburi de fotoni și interferențe. Cunoașterea celor trei acțiuni fundamentale constituie doar un foarte mic pas către analizarea oricărei situații *reale*, în care multitudinea schimburilor de fotoni face imposibil orice calcul – este nevoie să se capete experiență în privința a care dintre posibilități sunt mai importante. Și astfel, inventăm idei precum „indice de refracție“, ori „compresibilitate“, ori „valență“, care să ne ajute să facem calcule de o manieră aproximativă, atunci când la nivel inferior avem de-a face cu o cantitate



**Figura 73.** Diagrama folosită de Dirac pentru calcularea momentului magnetic al unui electron este foarte simplă. Valoarea reprezentată de această diagramă va fi numită 1.



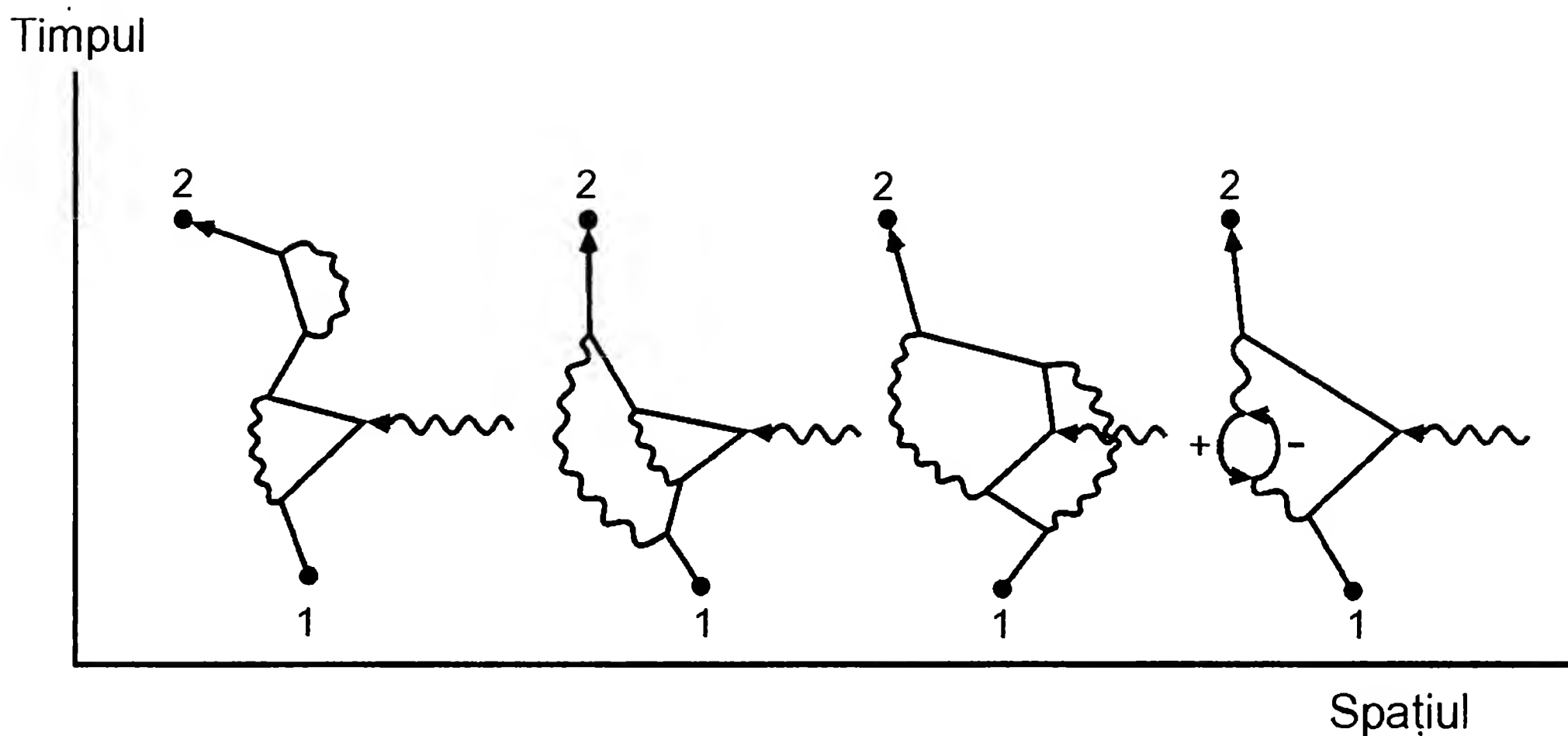
**Figura 74.** Experimente de laborator relevă faptul că valoarea efectivă a momentului magnetic al unui electron nu este 1, ci un pic mai mare. Aceasta din cauză că el are la dispoziție niște alternative: electronul poate emite un foton și îl poate apoi absorbi – varianta necesitând două E(de la A la B)-uri suplimentare, un F(de la A la B) și două  $j$ -uri suplimentare. Schwinger a calculat că retușul necesar pentru a ține cont de această alternativă este egal cu  $(j \times j) : (2\pi)$ . Cum această variantă nu poate fi deosebită din punct de vedere experimental de maniera originală în care se poate deplasa electronul – el pornește din punctul 1 și sfârșește în punctul 2 – săgețile corespunzătoare trebuie adunate, și apare interferență.

enormă de detalii. Este la fel ca diferența între a cunoaște regulile șahului – care sunt fundamentale și simple – și a juca șah bine – care implică înțelegerea caracterului fiecărei poziții și natura diverselor situații – lucru ce este mult mai dificil și mai avansat.

Domeniile fizicii care se preocupă de întrebări precum de ce fierul (care are 26 de protoni) este magnetic iar cuprul (cu 29) nu, sau de ce un gaz este transparent și altul nu, se numesc „fizica stării solide“, sau „fizica stării lichide“, sau „fizica cinstită“. Domeniul fizicii care a descoperit aceste trei mici și simple acțiuni (partea cea mai complicată) se numește „fizica fundamentală“ – ne-am arogat această denumire pentru a-i face pe ceilalți fizicieni să se simtă stânjeniți! În ziua de astăzi, cele mai interesante probleme și, în mod cert, cele mai practice, se găsesc, fără doar și poate, în cadrul fizicii stării solide. Însă cineva a spus cândva că nimic nu este mai practic decât o teorie bine pusă la punct; iar teoria electrodinamicii cuantice este, în mod categoric, o teorie bine pusă la punct.

În fine, aș dori să revin la numărul 1,00115963221, numărul despre care v-am spus în prima prelegere că a fost măsurat și calculat cu atâta exactitate. Acest număr reprezintă reacția unui electron la aplicarea din exterior a unui câmp magnetic – ceva ce se numește „moment magnetic“. Atunci când Dirac a dedus prima dată regulile de calcul pentru acest număr, el a folosit formula pentru  $E$ (de la A la B) și a obținut un rezultat foarte simplu, pe care în unitățile noastre îl vom considera drept 1. Diagrama corespunzătoare acestei prime aproximări pentru momentul magnetic al unui electron este foarte simplă – electronul se deplasează dintr-un loc în altul în spațiotimp și se cuplează cu un foton de la un magnet (a se vedea Figura 73).

După câțiva ani, s-a descoperit că această valoare nu era exact 1, ci un pic mai mare – ceva în jurul a 1,00116. Această corecție a fost dedusă prima dată în 1948, de către Schwinger, ca fiind egală cu  $j \times j$  împărțit la  $2\pi$ , și se datorează unei maniere alternative în care electronul se poate deplasa dintr-un loc în altul: în loc să meargă direct dintr-un punct în celălalt, electronul se deplasează o vreme, și brusc emite un foton; apoi (oroare!) el își absoarbe propriul foton (a se vedea Figura 74). Poate că este ceva „imoral“ în asta, dar asta face electronul! Pentru a calcula săgeata corespunzătoare acestei alternative, trebuie să construim câte o săgeată pentru fiecare punct din spațiotimp în care ar putea fi emis fotonul și pentru fiecare punct în care el ar putea fi absorbit. Astfel, vom avea două  $E$ (de la A la B)-uri suplimentare, un  $F$ (de la A la B) și două  $j$ -uri suplimentare, toate înmulțite între ele.

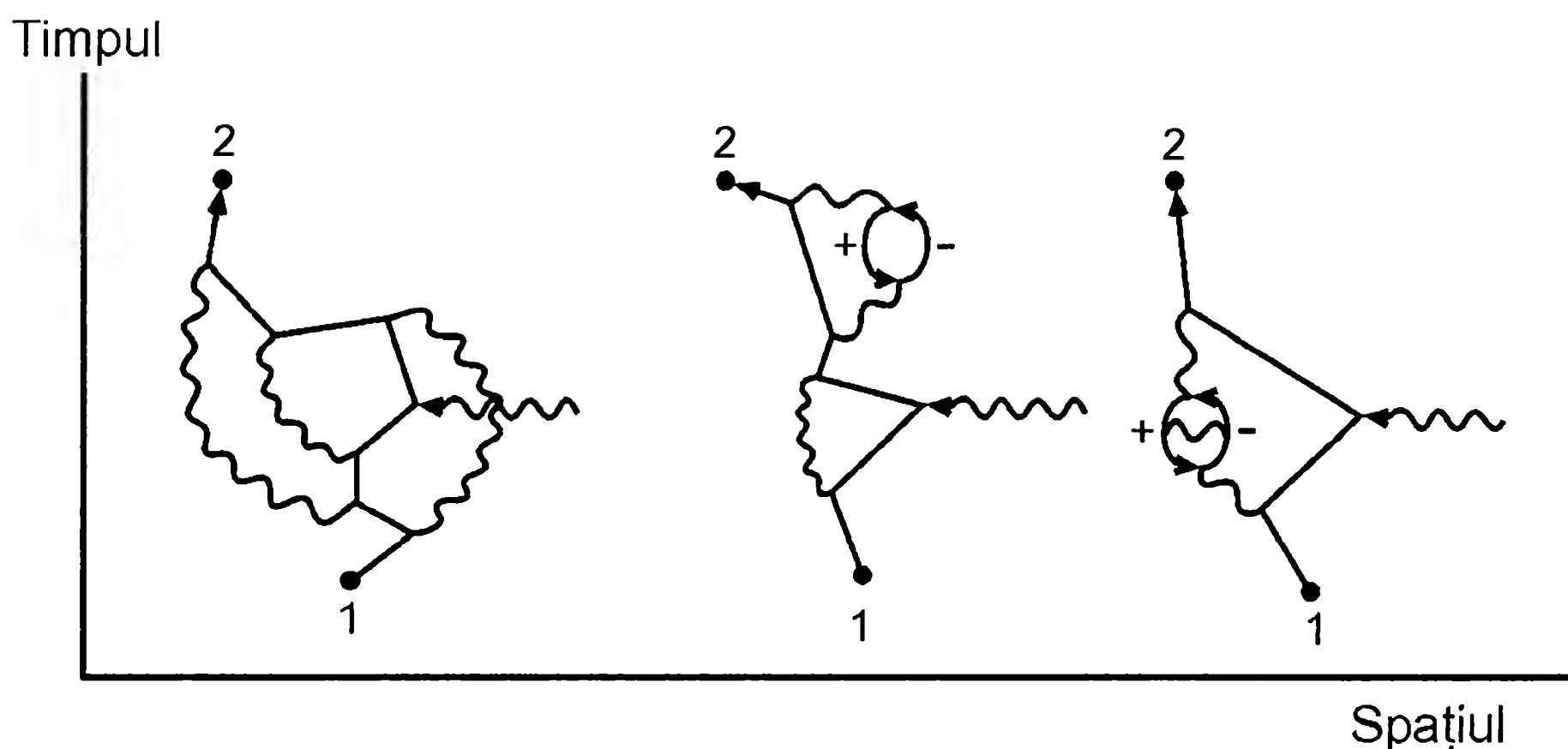


**Figura 75.** Experimentele de laborator au devenit atât de exacte, încât a trebuit calculate alte noi alternative, implicând patru cuplări suplimentare (pe toate punctele intermediare posibile din spațiotimp). Unele dintre acestea sunt reprezentate în desenul de față. Alternativa din partea dreaptă a desenului implică dezintegrarea unui foton într-o pereche pozitron-electron (așa cum s-a arătat în Figura 64), care la rândul lor se anihilează spre a forma un nou foton, absorbit în ultimă instanță de către electron.

Studentii învață cum să facă acest calcul simplu în cadrul cursului lor elementar de electrodinamică cuantică, în anul doi de doctorat.

Dar ia stați așa; în cadrul experimentelor, comportarea unui electron a fost măsurată cu o asemenea precizie, încât trebuie să luăm în considerare și alte posibilități de calcul: toate modurile în care s-ar putea deplasa electronul dintr-un loc în altul cu *patru* cuplări suplimentare (a se vedea Figura 75). Există trei feluri în care electronul poate emite și absorbi doi foton. Mai există, de asemenea, și o posibilitate nouă, interesantă (prezentată în partea din dreapta a Figurii 75): se emite un foton, el produce o pereche pozitron-electron, și – încă o dată, dacă vă înfrânați obiecțiile „morale” – cei doi se anihilează, creând un nou foton, ce este în cele din urmă absorbit de electron. Această posibilitate trebuie și ea avută în vedere!

Două grupuri „independente” de fizicieni au avut nevoie de doi ani pentru a calcula acest nou termen, și de încă un an după aceea pentru a realiza că undeva se strecurase o greșeală – experimentatorii



**Figura 76.** În clipa de față se fac în continuare calcule pentru a produce o valoare teoretică încă și mai exactă. Următoarea contribuție la amplitudinea evenimentului o constituie toate variantele implicând șase cuplări suplimentare – este vorba de ceva în jur de 70 de diagrame, dintre care trei sunt reprezentate în desenul de față. Din anul 1983, valoarea teoretică a devenit 1,00115965246, cu o marjă de eroare de circa 20 pentru ultimele două zecimale; numărul experimental este 1,00115965221, cu o marjă de aproximativ 4 pentru ultima cifră. Această precizie este echivalentă cu a măsura distanța de la Los Angeles la New York, o distanță de peste 5000 de kilometri, cu o exactitate de un fir de păr.

determinaseră o valoare ușor diferită, și pentru o scurtă vreme a părut că era prima dată când teoria nu concorda cu experimentul. Dar nu: era o greșeală de calcul. Cum fusese posibil ca două grupuri să facă aceeași greșeală? S-a dovedit că aproape de terminarea calculelor, cele două grupuri și-au comparat notițele între ele și au aplanat diferențele existente în calculele lor, deci ele nu fuseseră cu adevărat independente.

Termenul cu șase  $j$ -uri suplimentare implică încă și mai multe modalități în care s-ar putea petrece evenimentul, și vă voi desena câteva dintre ele (a se vedea Figura 76). A fost nevoie de douăzeci de ani pentru a introduce această precizie suplimentară în valoarea teoretică a momentului magnetic al unui electron. Între timp, experimentatorii au efectuat determinări încă și mai detaliate, și au adăugat numărului lor încă alte câteva zecimale – iar teoria continuă să vină în concordanță cu acesta. Așadar, pentru a efectua calculele, noi realizăm aceste diagrame, notăm lucrurile cărora ele le corespund din punct de

vedere matematic, și adunăm niște amplitudini – o procedură directă, ca dintr-o „carte de bucate”. Ca atare, ea poate fi efectuată de mașini. Acum, că dispunem de calculatoare supermeseriașe, ne-am apucat să calculăm termenul cu opt  $j$ -uri suplimentare. La ora actuală, numărul teoretic este egal cu 1,00115965246; experimental, el are valoarea 1,00115965221, plus sau minus 4 la ultima cifră zecimală. O parte din imprecizia valorii teoretice (aproximativ 4 pentru ultima cifră zecimală) se datorează rotunjirilor pe care le face calculatorul; marea parte a ei (circa 20) se datorează faptului că nu se cunoaște cu exactitate valoarea lui  $j$ . Termenul corespunzător la opt  $j$ -uri suplimentare implică ceva de ordinul a nouă sute de diagrame, fiecare cu câte o sută de mii de termeni – un calcul nemaipomenit – și valoarea lui este calculată chiar în timp ce eu vă vorbesc.

Sunt convins că peste alți câțiva ani, valorile teoretică și experimentală ale momentului magnetic al unui electron vor fi determinate cu încă și mai multe zecimale. Desigur, nu sunt sigur dacă cele două vor continua să concorde. Asta nu se poate spune până când nu faci calculele și experimentele.

Și astfel, am ajuns înapoi la numărul cu care am ales să vă „intimidez” la începutul acestor prelegeri. Sper că acum înțelegeți mult mai bine semnificația acestui număr: el reprezintă gradul extraordinar de precizie cu care am verificat în mod constant faptul că strania teorie a electrodinamicii cuantice este într-adevăr corectă.

Pe parcursul acestor prelegeri, am simțit o reală încântare să vă arăt că prețul plătit pentru atingerea unei asemenea precizii teoretice, a fost erodarea bunului-simț. Trebuie să acceptăm anumite comportări foarte bizare: amplificarea și atenuarea probabilităților, reflexia luminii pe toate zonele unei oglinzi, propagarea luminii pe traiectorii altele decât liniile drepte, fotoni deplasându-se cu viteze mai mari ori mai mici decât viteza convențională a luminii, electroni mergând înapoi în timp, fotoni dezintegrându-se brusc într-o pereche pozitron-electron, și așa mai departe. Asta trebuie să facem pentru a putea aprecia ceea ce trebăluiește Natura îndărătul mării majorități a fenomenelor pe care le observăm în această lume.

Cu excepția detaliilor tehnice legate de polarizare, v-am descris întregul cadru conceptual în care înțelegem noi toate aceste fenomene. Desenăm *amplitudini* pentru fiecare modalitate în care se poate petrece un eveniment și, acolo unde, în circumstanțe obișnuite, ne-am fi așteptat să adunăm probabilitățile, adunăm amplitudinile; iar acolo



unde ne-am fi așteptat să înmulțim probabilități, înmulțim amplitudini. La început, a gândi totul în termeni de amplitudini s-ar putea să creeze dificultăți, din cauza caracterului lor abstract; dar, după un timp, lumea se obișnuiește cu acest limbaj ciudat. În spatele atât de multor fenomene pe care le vedem zi de zi, se ascund numai trei acțiuni de bază: una este descrisă de către banalul număr de cuplare,  $j$ ; celelalte două, de către funcțiile  $F$ (de la A la B) și  $E$ (de la A la B), strâns înrudite între ele. Asta-i tot, și din acestea provin toate celelalte legi ale fizicii.

Totuși, înainte de a încheia această prelegere, aș dori să mai fac câteva remarci. Spiritul și caracterul electrodinamicii cuantice pot fi înțelese și fără a introduce acest detaliu tehnic legat de polarizare. Însă sunt sigur că v-ați simți cu toții neplăcut dacă n-aș spune câteva cuvinte despre chestiunea pe care am omis-o. Se dovedește că fotonii ne parvin în patru varietăți, numite polarizări. Acestea au o legătură de natură geometrică cu direcțiile spațiului și timpului. Astfel, există fotoni polarizați pe direcțiile X, Y, Z și T. (Poate veți fi auzit pe undeva că lumina ne parvine în doar două stări de polarizare – de exemplu, un foton ce se deplasează de-a lungul axei Z poate fi polarizat perpendicular, fie pe direcția axei X, fie pe Y. Ei bine, ați ghicit: în situații în care fotonul se deplasează pe o distanță lungă, și ne apare a se deplasa cu viteza luminii, amplitudinile corespunzătoare termenilor pentru Z și T se anulează reciproc. Însă pentru fotonii virtuali care se deplasează de la un proton la un electron în cadrul unui atom, cea care contează cel mai mult este componenta T.)

De o manieră asemănătoare, un electron se poate afla în una dintr-un număr de patru condiții, legate și ele de geometrie, dar într-un mod mai subtil. Am putea numi aceste condiții 1, 2, 3 și 4. Calcularea amplitudinii ca un electron să se deplaseze din punctul A în punctul B în spațiotimp, devine oarecum mai complicată, căci ne-am putea acum pune întrebări precum: „Care este amplitudinea ca un electron eliberat în punctul A în condiția 2, să ajungă în punctul B în condiția 3?” Cele șaisprezece combinații posibile – provenind din cele patru condiții distincte în care electronul poate porni din A și cele patru condiții distincte în care el poate ajunge în B – sunt legate într-o manieră simplă din punct de vedere matematic de formula  $E$ (de la A la B), despre care v-am vorbit.

Pentru un foton, nu este necesară o asemenea modificare. Astfel, un foton care în A este polarizat pe direcția lui X, va continua să fie polarizat pe direcția lui X și când ajunge în B, amplitudinea fiind dată de  $F$ (de la A la B).



Polarizarea produce un număr mare de cuplări distincte posibile. De exemplu, ne-am putea întreba: „Care este amplitudinea ca un electron aflat în condiția 2 să absoarbă un foton polarizat pe direcția lui X și, ca rezultat, să se transforme într-un electron în condiția 3?” Nu chiar toate combinațiile posibile de electroni și fotoni polarizați se pot cupla, însă cele care o fac, o fac cu aceeași amplitudine  $j$  și, uneori, cu o rotire suplimentară a săgeții cu un multiplu oarecare de  $90^\circ$ .

Aceste posibilități pentru diferitele tipuri de polarizări și pentru natura cuplării, pot fi deduse toate, într-o manieră foarte elegantă și frumoasă, din principiile electrodinamicii cuantice și din două presupuneri suplimentare: 1) rezultatele unui experiment nu sunt afectate de rotirea pe o altă direcție a aparatului cu care se face experimentul; 2) de asemenea, nu contează dacă aparatul se află într-o navă spațială care se deplasează cu o viteză constantă oarecare. (Aceasta din urmă reprezintă Principiul Relativității.)

Această analiză elegantă și generală ne arată că fiecare particulă trebuie să se afle într-o clasă sau alta de polarizări posibile, pe care le vom numi spin 0, spin  $1/2$ , spin 1, spin  $3/2$ , spin 2 și așa mai departe. Diversele clase se comportă în moduri diferite. O particulă cu spin 0 este cea mai simplă - ea are doar o componentă, și practic nu este polarizată deloc. (Electronii falși și fotonii pe care i-am luat în considerare în această prelegere sunt particule cu spin 0. Până acum, nu s-au descoperit particule fundamentale cu spin 0.) Un electron real reprezintă un exemplu de particulă cu spin  $1/2$ , iar un foton real este un exemplu de particulă cu spin 1. Atât particulele cu spin  $1/2$  cât și cele cu spin 1, au patru componente. Celelalte tipuri ar trebui să aibă mai multe componente, cum ar fi, de pildă, particulele cu spin 2, cu zece componente.

Am afirmat că legătura între relativitate și polarizare este simplă și elegantă, dar nu sunt sigur că v-o pot explica de o manieră simplă și elegantă! (Mi-ar trebui cel puțin o prelegere în plus pentru a o face.) Deși detaliile legate de polarizare nu sunt esențiale pentru înțelegerea spiritului și caracterului electrodinamicii cuantice, ele sunt, desigur, esențiale pentru calcularea corectă a oricărui proces real, și adesea au efecte profunde.

În aceste prelegeri, ne-am concentrat asupra interacțiunilor relativ simple ale electronilor și protonilor la distanțe mici, în care sunt implicate doar puține particule. Dar aș dori să fac o remarcă sau două în legătură cu modul în care aceste interacțiuni apar la scară mai largă,

la care se schimbă numere foarte, foarte mari de fotoni. La o asemenea scară, calcularea săgeților devine foarte complicată.

Există, totuși, unele situații care nu sunt chiar atât de greu de analizat. De pildă, există circumstanțe în care amplitudinea de emisie a unui foton de către o sursă este independentă de emisia sau nu a vreunui alt foton. Aceasta se poate întâmpla atunci când sursa este foarte grea (nucleul unui atom) sau atunci când un număr foarte mare de electroni se mișcă toți în același fel, ca în cazul în care urcă și coboară prin antena unei stații de emisie, ori se rotesc prin înfășurările unui electromagnet. În astfel de situații se emit un număr mare de fotoni, toți de același fel. Într-un asemenea mediu, amplitudinea ca un electron să absoarbă un foton este independentă de faptul dacă el, sau orice alt electron, a absorbit sau nu vreun alt foton mai devreme. Ca atare, întreaga sa comportare poate fi dată prin intermediul doar a acestei amplitudini, ca el să absoarbă un foton, amplitudine ce depinde numai de poziția electronului în spațiu și timp. Pentru a descrie astfel de circumstanțe, fizicienii folosesc cuvinte din vorbirea obișnuită. Ei spun că electronul se mișcă într-un câmp extern.

Fizicienii folosesc cuvântul „câmp” pentru a descrie o mărime ale cărei valori depind de situarea în spațiu și timp. Temperatura atmosferică oferă un bun exemplu: ea variază în funcție de locul și momentul în care efectuăm măsurarea. Atunci când luăm în discuție polarizarea, câmpul prezintă mai multe componente. (Există patru componente, corespunzând amplitudinilor de absorbire a unui foton în fiecare din stările de polarizare – X, Y, Z, T – în care el s-ar putea afla, numite în limbaj tehnic potențial electromagnetic vectorial și potențial electromagnetic scalar. Din combinarea acestora, în fizica clasică se obțin niște componente mai convenabile, numite câmp electric și câmp magnetic.)

În situația în care câmpurile electric și magnetic variază suficient de lent, amplitudinea ca un electron să străbată o distanță mare depinde de drumul pe care o ia. Așa cum am văzut mai înainte în cazul luminii, drumurile cele mai importante sunt cele pentru care unghiurile amplitudinilor corespunzătoare unor traiectorii învecinate sunt aproape aceleași. Rezultatul este că particula nu se deplasează neapărat în linie dreaptă.

Cu aceasta, am ajuns înapoi drept până la fizica clasică, în cadrul căreia se presupune că există câmpuri și că electronii se mișcă prin acestea în așa fel încât o anumită mărime să ia valoare cât mai mică. (Fizicienii numesc această mărime fizică „acțiune”, și enunță această regulă sub titulatura de „Principiul Minimei Acțiuni”.) Acesta reprezintă un exemplu de manieră în care regulile electrodinamicii cuantice

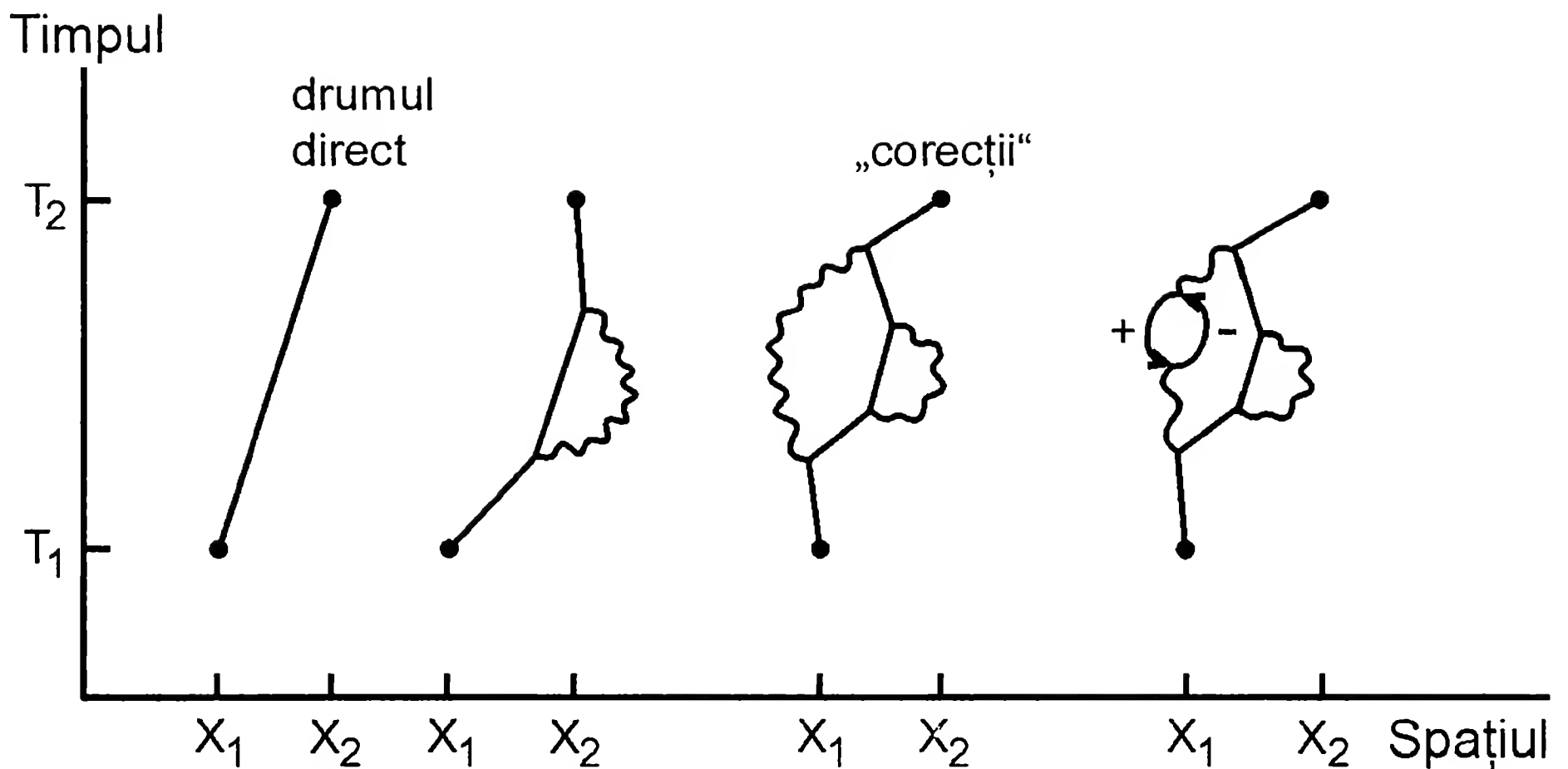
produc fenomene la scară mare. Ajunși în acest punct, am putea extinde discuția în multe direcții, dar trebuie să ne limităm la scopul acestor prelegeri. Am dorit doar să vă reamintesc faptul că efectele pe care le vedem la scară mare sunt produse tot de interacțiunile electronilor cu fotonii, și că, în ultimă instanță, sunt toate descrise de teoria electro-dinamicii cuantice.



Voi împărți această prelegere în două părți. Mai întâi, voi vorbi despre unele chestiuni legate de însăși teoria electrodinamicii cuantice, presupunând că tot ce există în lume nu sunt decât electroni și fotoni. Apoi, voi vorbi despre relația electrodinamicii cuantice cu restul fizicii.

Cea mai șocantă caracteristică a teoriei electrodinamicii cuantice o reprezintă cadrul conceptual al amplitudinilor, care v-ar putea face să credeți că este semnul existenței unor necazuri de natură oarecare! Totuși, sunt mai bine de cincizeci de ani de când fizicienii își fac de lucru cu aceste amplitudini, și s-au obișnuit foarte mult cu ele. Mai mult, toate noile particule și noile fenomene pe care le putem observa, se încadrează perfect în tot ceea ce se poate demonstra pornind de la un asemenea cadru conceptual, în care probabilitatea unui eveniment este egală cu pătratul unei săgeți finale, obținute prin compunerea unor săgeți în tot felul de moduri (cu interferență, și celelalte). Deci, acest cadru conceptual *nu admite niciun dubiu din punct de vedere experimental*: puteți avea oricâte îndoieli filosofice doriți în legătură cu semnificația pe care o au amplitudinile (dacă au, într-adevăr, vreuna), dar, din cauza faptului că fizica este o știință experimentală, iar cadrul conceptual concordă cu experimentul, el este până acum valabil.

Există o serie de probleme asociate cu teoria electrodinamicii cuantice, privitoare la îmbunătățirea metodei de calcul pentru suma tuturor acelor mici săgeți – diverse tehnici, abordabile în diferite situații – care îi iau unui doctorand trei-patru ani până să le stăpânească. Cum ele constituie probleme tehnice, nu le voi discuta aici. Este doar o chestiune de a îmbunătăți în mod constant tehnicile de analizare a ceea ce afirmă teoria în diverse circumstanțe.

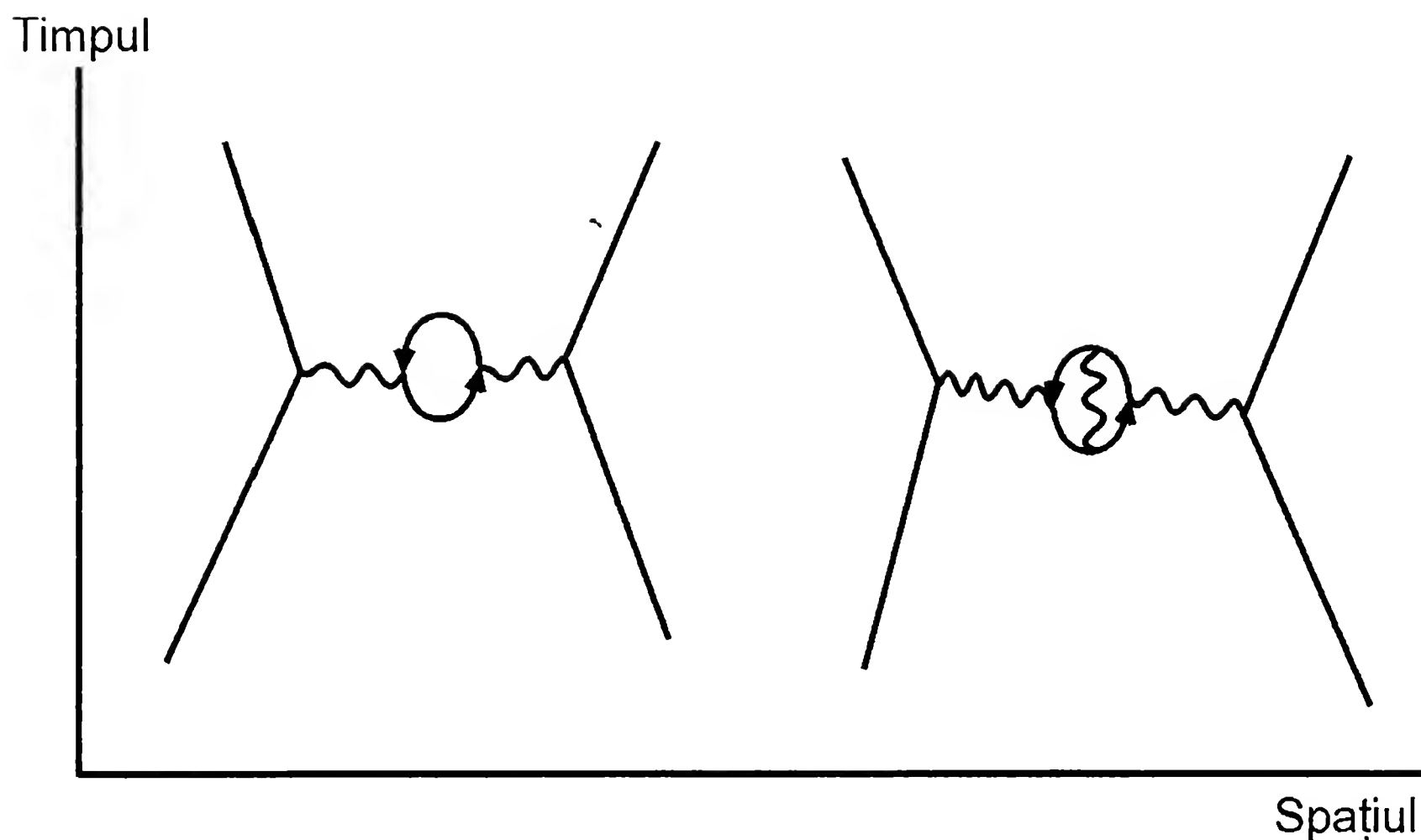


**Figura 77.** Atunci când calculăm amplitudinea ca un electron să se deplaseze dintr-un punct în altul în spațiotimp, pentru drumul direct folosim formula  $E(\text{de la A la B})$ . (Apoi facem niște „corecții”, care includ emiterea sau absorbția unuia sau mai multor fotoni.)  $E(\text{de la A la B})$  depinde de  $(X_2 - X_1)$ ,  $(T_2 - T_1)$  și  $n$ , un număr pe care îl introducem în formulă ca să ne iasă corect rezultatul. Acest număr se numește „masă de repaus” a unui electron „ideal”, și nu poate fi determinat experimental, deoarece masa de repaus a unui electron real,  $m$ , include toate acele corecții. Există o anumită dificultate în calcularea valorii lui  $n$  care să fie folosită în expresia lui  $E(\text{de la A la B})$ , a cărei surmontare a luat douăzeci de ani.

Dar există o problemă în plus, caracteristică teoriei electrodinamicii cuantice înseși, a cărei surmontare a necesitat douăzeci de ani. Ea are legătură cu electronii și fotonii ideali și cu numerele  $n$  și  $j$ .

Dacă electronii ar fi ideali, și dacă s-ar deplasa dintr-un punct în altul în spațiotimp *numai* pe drumul direct (reprezentat în Figura 77 în partea din stânga a desenului), atunci n-ar fi nicio problemă:  $n$  ar fi pur și simplu masa unui electron (pe care o putem determina practic), iar  $j$  ar fi pur și simplu „sarcina” acestuia (amplitudinea ca electronul să se cupleze cu un foton). Și și aceasta poate fi determinată experimental.

Dar nu există astfel de electroni ideali. Masa pe care o observăm în laborator este cea a unui electron *real*, care, din când în când, emite și absoarbe propriii săi fotoni, și, ca atare, ea depinde de amplitudinea



**Figura 78.** Valoarea măsurată experimental a amplitudinii ca un electron să se cupleze cu un foton, un misterios număr  $e$ , este o valoare ce include toate „corecțiile” referitoare la deplasarea unui foton dintr-un punct în altul în spațiotimp. Două dintre acestea sunt reprezentate în desenul de față. În calcule, noi avem nevoie de un număr  $j$ , care să nu includă aceste corecții, ci doar deplasarea fotonului direct dintr-un punct în altul. Determinarea acestui  $j$  se lovește de o dificultate asemănătoare cu cea întâmpinată la determinarea valorii lui  $n$ .

de cuplare  $j$ . Iar sarcina pe care o observăm în laborator este cea dintre un electron *real* și un foton *real* – care, din când în când, poate forma o pereche pozitron-electron – și, ca atare, ea depinde de  $E$  (de la  $A$  la  $B$ ), ceea ce îl implică pe  $n$  (a se vedea Figura 78). Cum masa și sarcina unui electron sunt afectate de aceste – și de toate celelalte – alternative, masa  $m$  măsurată experimental și sarcina  $e$  măsurată experimental ale electronului, diferă de numerele  $n$  și  $j$  pe care le folosim în calculele noastre.

Dacă ar exista o legătură matematică bine determinată între  $n$  și  $j$  pe de o parte, și  $m$  și  $e$  pe de cealaltă parte, n-ar fi nicio problemă: pur și simplu, am calcula valorile lui  $n$  și  $j$  de la care trebuie să pornim pentru a obține valorile experimentale  $m$  și  $e$ . (Dacă rezultatele nu s-ar potrivi cu  $m$  și  $e$ , am învârti valorile inițiale ale lui  $n$  și  $j$  până când ar face-o.)

Haideți să vedem cum se calculează efectiv  $m$ -ul. Scriem o serie de termeni care arată cam ca cea pe care am întâlnit-o la momentul magnetic al unui electron. Primul termen nu conține cuplări – doar  $E$  (de la A la B) – și reprezintă deplasarea unui electron ideal direct dintr-un punct în altul în spațiu-timp. Al doilea termen are două cuplări și reprezintă emiterea și absorbția unui foton. Urmează apoi termenii cu patru, șase, opt cuplări, și așa mai departe (câteva din aceste corecții sunt prezentate în Figura 77).

Atunci când se calculează termenii implicând cuplări, trebuie luate în considerare (ca întotdeauna) toate punctele în care se pot produce acestea, mergând până la cazurile în care două puncte de cuplare se suprapun – distanța între ele este egală cu zero. Problema este că, atunci când încercăm să ducem calculele până la valori ale distanțelor tinzând spre zero, ecuațiile ne explodează în față și ne rezultă lucruri lipsite de sens... cum ar fi infinitii. Acest lucru a creat o grămadă de necazuri la început, când a apărut teoria electrodinamicii cuantice. Orice încercam să calculăm, obțineam infinit! (Pentru a fi consistenți din punct de vedere matematic, trebuia să putem merge cu calculele până la distanțe tinzând spre zero, dar tocmai acolo nu găseam niciun  $n$  sau  $j$  care să aibă vreun sens; exact acolo era buba.)

Ei bine, dacă în loc să includem toate punctele de cuplare posibile, până la cele între care distanța tinde la zero, ne *oprim* cu calculul la valori foarte mici ale distanței – să zicem,  $10^{-30}$  centimetri, care este de miliarde și miliarde de ori mai mică decât orice lucru observabil experimental (actualmente, de ordinul a  $10^{-16}$  centimetri) – obținem pentru  $n$  și  $j$  niște valori bine precizate, ce pot fi utilizate pentru ca masa și sarcina rezultate din calcule să se potrivească cu  $m$ -ul și  $e$ -ul determinate experimental. Acuma, iată care-i baiul: dacă ne oprim cu calculul la o altă valoare a distanței – să zicem  $10^{-40}$  centimetri – valorile lui  $n$  și  $j$  necesare pentru a obține aceleași  $m$  și  $e$  sunt *altele*!

Douăzeci de ani mai târziu, în 1949, Hans Bethe și Victor Weisskopf au sesizat un lucru: ei au observat că, pornind de la aceleași valori ale lui  $m$  și  $e$  și determinând pe  $n$  și  $j$  de două ori, prin două calcule care să se oprească la valori diferite ale distanțelor, dacă se ia după aceea o *altă* problemă oarecare, și se fac calculele de două ori, cu valorile diferite găsite pentru  $n$  și  $j$ , rezultatele compunerii săgeților corespunzătoare includerii tuturor termenilor, sunt aproape egale! În fapt, cu cât cele două calcule se opresc mai aproape de distanța nulă, cu atât cele două  $n$ -uri și  $j$ -uri dau rezultate mai apropiate pentru acea altă problemă! Pentru a confirma faptul că acest lucru este adevărat, Schwinger, Tomonaga și subsemnatul am pus la punct în mod independent niște



metode prin intermediul cărora să se poată face calcule concrete (am luat și premii pentru asta). Lumea putea aplica, în sfârșit, teoria electro-dinamicii cuantice!

Așadar, se vedește că *singurele* lucruri care depind de distanțele mici dintre punctele de cuplare sunt valorile lui  $n$  și  $j$ ... *numere teoretice, care oricum nu sunt observabile în mod direct*; orice altceva care *poate* fi observat, pare a nu fi afectat.

Jocul de alba-neagra pe care îl jucăm pentru a găsi valorile lui  $n$  și  $j$  poartă numele tehnic de „renormare”. Dar, indiferent cât de elevat ar fi cuvântul, el reprezintă ceea ce eu aș numi o procedură fără noimă. Faptul de a apela la astfel de scamatorii ne-a împiedicat să demonstrăm că teoria electrodinamicii cuantice este consistentă în sine din punct de vedere matematic. Este de mirare că până la ora actuală nu s-a demonstrat în vreun fel sau altul self-consistența ei; eu suspectez că renormalizarea nu se legitimează din punct de vedere matematic. Ceea ce este sigur, este faptul că nu dispunem de o modalitate matematică valabilă de a descrie teoria electrodinamicii cuantice: o asemenea înșiruire de cuvinte prin care descriem legătura între  $n$  și  $j$  pe de o parte, și  $m$  și  $e$  pe de cealaltă parte, nu constituie o matematică valabilă.<sup>1</sup>

Se pune o întrebare cât se poate de profundă și de frumoasă în legătură cu constanta de cuplare determinată experimental,  $e$  – amplitudinea ca un electron real să emită sau să absoarbă un foton real. Este un simplu număr, a cărui valoare măsurată este aproximativ egală cu  $-0,08542455$ . (Prietenii mei fizicieni ar putea să nu recunoască acest număr, deoarece ei preferă să-l țină minte sub forma inversului pătratului său: aproximativ  $137,03597$ , cu o imprecizie în jur de doi pentru ultima zecimală. El a constituit un mister încă de la descoperirea sa, cu mai bine de cincizeci de ani în urmă, și toți fizicienii teoreticieni care se respectă își pun mare pe perete acest număr și cugetă la el.)

Numaidecât veți dori să știți de unde provine acest număr referitor la cuplare: are el vreo legătură cu  $\pi$ , sau poate cu baza logaritmilor

---

<sup>1</sup> Un alt mod de a descrie această dificultate, este de a afirma că poate ideea că două puncte pot fi oricât de apropiate între ele este greșită – că presupunerea că putem folosi geometria până la ultimul crâmpei de spațiu este falsă. Dacă luăm distanța minimă posibilă dintre două puncte ca fiind  $10^{-100}$  centimetri (la ora actuală, cea mai mică distanță implicată de vreun experiment este de circa  $10^{-16}$  centimetri) este în regulă, infinitii dispar, dar se ivesc alte inconsistențe, cum ar fi faptul că probabilitatea totală a unui eveniment ne iese a fi puțin peste sau sub 100%, sau că obținem energii negative în cantități infinitezimale. S-a sugerat că aceste inconsistențe apar din cauza faptului că nu am luat în considerare efectele gravitației, care în mod normal sunt foarte, foarte slabe, dar la distanțe de sub  $10^{-33}$  centimetri devin importante.

naturali? Nu știe nimeni. Este unul dintre *cele mai mari* afurisite de mistere ale fizicii: un *număr magic*, ce ne parvine fără nicio înțelegere din partea noastră. Ați putea spune că „mâna lui Dumnezeu“ a scris numărul, și că „nu cunoaștem în ce fel a manevrat El creionul“. Știm cum să învârtim lucrurile din punct de vedere experimental pentru a putea măsura acest număr cu foarte mare precizie, dar nu știm cum să le învârtim pentru a face să ne iasă acest rezultat pe calculator... altfel decât tastându-l pe șest!

O teorie bună ar trebui să afirme că  $e$  este egal cu radical din trei împărțit la doi pi pătrat, sau ceva de genul acesta. Au existat, din când în când, sugestii în legătură cu ce reprezintă  $e$ , dar niciuna nu s-a dovedit utilă. Mai întâi, Arthur Eddington a demonstrat prin simplă logică, faptul că numărul îndrăgit de fizicieni trebuia să fie 136, valoarea experimentală cunoscută la vremea aceea. Apoi, în momentul în care experimente mai exacte au arătat că numărul este mai aproape de 137, Eddington a descoperit o mică greșeală în argumentarea sa anterioară, și a demonstrat, încă o dată prin simplă logică, faptul că trebuia să fie vorba de numărul întreg 137! Tot la câțeva vreme, cineva observa că o anumită combinație de pi-uri, și de e-uri (baza logaritmilor naturali), și de doiuri, și de cinciuri, generează misterioasa constantă de cuplare, dar este un lucru nu pe de-a-ntregul apreciat de cei ce jonglează cu aritmetica, faptul că din pi-uri și din e-uri și din celelalte, se pot obține surprinzător de *multe* numere. Așa încât, de-a lungul istoriei fizicii moderne, au existat articole după articole scrise de persoane care au produs un  $e$  cu mai multe zecimale exacte, numai pentru ca la următoarea îmbunătățire a determinării lui experimentale, numărul respectiv să nu mai concorde cu valoarea măsurată.

Chiar dacă astăzi trebuie să recurgem la o procedură fără noimă pentru a-l calcula pe  $j$ , este posibil ca într-o bună zi să se descopere o legătură matematică legitimă între  $j$  și  $e$ . Aceasta ar însemna ca  $j$  să fie numărul misterios din care provine  $e$ . În acest caz, fără doar și poate că ar urma o nouă avalanșă de articole, care să ne învețe cum să-l calculăm pe  $j$  „cu mâna liberă“, ca să mă exprim astfel, propunând să împărțim unu la patru pi, ori mai știu eu ce.

Cu aceasta, am terminat de expus necazurile legate de electrodinamica cuantică.

Atunci când am plănuit să țin aceste prelegeri, am intenționat să mă concentrez doar asupra acelei părți a fizicii pe care o cunoaștem foarte bine – să o descriu în întregime și să nu mai spun nimic altceva.

Dar acum, că am ajuns până în acest punct, fiind profesor (adică, având obiceiul să nu mă pot opri din vorbit atunci când trebuie), nu pot rezista tentației să nu vă spun unele lucruri despre restul fizicii. În primul rând, trebuie să vă spun imediat că restul fizicii nu a fost verificat nici pe departe la fel de bine ca electrodinamica: unele dintre lucrurile pe care vi le voi pomeni reprezintă ghiceli de bun simț, altele constituie teorii elaborate parțial, iar altele încă sunt pure speculații. Ca urmare, prin comparație cu celelalte prelegeri, această prezentare o să arate oarecum ca un talmeș-balmeș: va fi incompletă și cu multe detalii lipsă. Cu toate acestea, se dovedește că structura teoriei QED servește drept o excelentă bază de descriere a altor fenomene din restul fizicii.

Voi începe prin a discuta despre protoni și neutroni, care alcătuiesc nucleeele atomilor. Atunci când au fost descoperiți, s-a crezut că protonii și neutronii sunt niște simple particule, dar foarte curând a devenit limpede că ele nu sunt simple – simple, în sensul că amplitudinea lor de a se deplasa dintr-un punct în altul să poată fi exprimată cu formula  $E(\text{de la } A \text{ la } B)$ , prin introducerea unei alte valori pentru numărul  $n$ . De exemplu, protonul are un moment magnetic care, dacă este calculat în aceeași manieră ca pentru electron, ar trebui să aibă o valoare apropiată de 1. Dar, de fapt, experimental valoarea lui iese cu totul aiurea: 2,79! În consecință, a devenit repede evident că în interiorul protonului se întâmplă ceva de care ecuațiile electrodinamicii cuantice nu pot da socoteală. Iar neutronul, care, dacă ar fi într-adevăr neutru, nu ar trebui să prezinte deloc interacțiune magnetică, are un moment magnetic în jur de -1,93! Deci, s-a știut de multă vreme că și cu interiorul neutronului este ceva putred.

Mai exista și problema referitoare la ce anume îi ține pe protoni și pe neutroni laolaltă în interiorul nucleului. S-a realizat imediat că nu putea fi vorba de schimbul de fotoni, deoarece forțele care mențineau nucleul legat erau mult mai puternice – energia necesară ruperii unui nucleu era mult mai mare decât cea necesară îndepărtării unui electron dintr-un atom, în aceeași măsură în care o bombă atomică este mult mai distructivă decât dinamita: explozia dinamitei reprezintă rearanjarea tiparelor de electroni, pe când explozia bombei atomice reprezintă rearanjarea tiparelor protoni-neutroni.

Pentru a se afla mai multe în legătură cu ce anume menține nucleeele legate, au fost efectuate experimente în care protoni cu energii din ce în ce mai mari erau izbiți de nucleee. Se aștepta să rezulte numai protoni și neutroni. Însă, atunci când energiile deveneau suficient de mari, apăreau noi particule. Mai întâi, a fost vorba de pioni, apoi de

lambda-uri, și de sigma-uri, și de rho-uri, până când au rămas fără litere din alfabet. Au urmat apoi particule numite cu numere (masele lor), cum ar fi sigma 1190 și sigma 1386. Curând a devenit limpede că numărul de particule din lume era nelimitat, și că depindea de cantitatea de energie folosită la ruperea nucleului. În prezent sunt peste patru sute de astfel de particule. Patru sute de particule este de neacceptat; este prea complicat!<sup>2</sup>

Mari descoperitori precum Murray Gell-Mann, aproape că și-au pierdut mințile încercând să se prindă de regulile după care se comportă toate aceste particule, și la începutul anilor '70 au venit cu teoria cuantică a interacțiunilor tari (sau „cromodinamica cuantică”), ai cărei actori principali sunt niște particule numite „quarkuri”. Toate particulele alcătuite din quarkuri se încadrează în două clase: unele, precum protonul și neutronul, sunt compuse din trei quarkuri (și poartă oribilul nume de „barioni”); celelalte, cum ar fi pionii, sunt alcătuite dintr-un quark și un antiquark (și sunt numite „mezoni”).

Dați-mi voie să construiesc un tabel al particulelor fundamentale, așa cum ne apar ele nouă astăzi (a se vedea Figura 79). Voi începe cu particulele care se deplasează dintr-un punct în altul potrivit formulei  $E(\text{de la A la B})$  – modificată pe baza unor reguli de polarizare la fel ca cele ale electronului – numite particule cu „spin  $1/2$ ”. Prima dintre aceste particule este electronul, iar numărul corespunzător masei este 0,511, exprimat în unități pe care le folosim tot mereu, numite MeV.<sup>3</sup>

Sub căsuța cu electronul voi lăsa un spațiu liber (care va fi completat mai târziu), iar sub acesta voi trece două tipuri de quarkuri:  $d$  și respectiv  $u$ . Masa acestor quarkuri nu este cunoscută cu exactitate; o ipoteză plauzibilă este undeva în jurul a 10 MeV pentru fiecare din ele. (Neutronul este un pic mai greu decât protonul, ceea ce pare să implice faptul că – așa cum veți vedea imediat – quarkul  $d$  este oarecum mai greu decât quarkul  $u$ .)

În dreptul fiecărei particule voi trece sarcina sa, sau constanta de cuplare, în termeni de  $-j$ , numărul corespunzător cuplării cu fotonii luat cu semn schimbat. Aceasta face ca sarcina pentru electron să fie  $-1$ , consistentă cu o convenție inițiată de Benjamin Franklin, convenție rămasă până în ziua de azi. Pentru quarkul  $d$ , amplitudinea de cuplare

<sup>2</sup> Deși în experimentele la energii înalte, din nucleu rezultă multe particule, în experimentele la energii joase – în condițiile mai obișnuite – se găsește că nucleeele conțin numai protoni și neutroni.

<sup>3</sup> Un MeV reprezintă o cantitate foarte mică – potrivită pentru astfel de particule – și corespunde unei mase de aproximativ  $1,78 \times 10^{-27}$  grame.

The diagram illustrates particle properties. On the right, a table lists particles and their characteristics:

particle	cu spin 1/2	nume	simbol	masa (MeV)	cuplare
electron	0	electron	<b>e</b>	0,511	-1
quark	-1/3		<b>d</b>	~10	-1/3
quark	+2/3		<b>u</b>	~10	+2/3

On the left, a separate box details the electron's properties:

electron
<b>e</b>
0,511

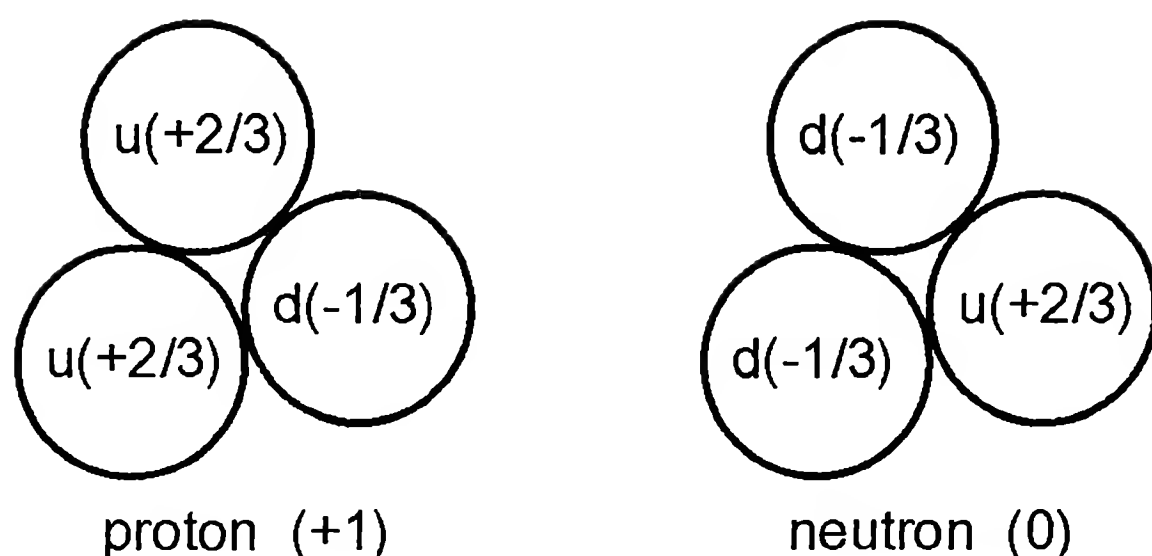
Labels with arrows point to the corresponding fields in the boxes: 'nume' points to 'electron', 'simbol' points to '**e**', and 'masa (MeV)' points to '0,511'. An arrow also points from 'cu spin 1/2' to the 'electron' row in the main table.

**Figura 79.** Lista noastră cu toate particulele de pe lumea asta, începe cu particulele cu „spin 1/2”: electronul (având o masă de 0,511 MeV) și două „arome” de quarkuri,  $d$  și  $u$  (ambele cu o masă de aproximativ 10 MeV). Electronii și quarkurile prezintă „sarcină” – adică, se pot cupla cu fotonii – în următoarele măsuri (în termeni de constanta de cuplare  $-j$ ):  $-1$ ,  $-1/3$  și  $+2/3$ .

cu un foton este  $-1/3$ , iar pentru quarkul  $u$  ea este  $+2/3$ . (Dacă ar fi știut Benjamin Franklin de existența quarkurilor, ar fi putut măcar conveni că sarcina electronului este  $-3$ !)

Acuma, sarcina unui proton este  $+1$ , iar a unui neutron este  $0$ . Învârtind un pic numerele, se observă că un proton – alcătuit din trei quarkuri – trebuie să fie compus din două  $u$ -uri și un  $d$ , în vreme ce un neutron – alcătuit tot din trei quarkuri – trebuie să fie compus din două  $d$ -uri și un  $u$  (a se vedea Figura 80).

Ce anume menține quarkurile laolaltă? Este oare vorba de fotonii care se duc de colo-colo? (Quarkurile, ca și electronii, emit și absorb fotoni, quarkul  $d$  având sarcina  $-1/3$ , iar quarkul  $u$  având sarcina  $+2/3$ .) Nu, forțele electrice sunt prea slabe pentru a face aceasta. S-a inventat ceva nou care să se perinde de colo-colo și să țină quarkurile laolaltă;



**Figura 80.** Toate particulele alcătuite din quarkuri se încadrează în una sau cealaltă din două clase posibile: cele compuse dintr-un quark și un antiquark, și cele compuse din trei quarkuri. Dintre acestea din urmă, protonii și neutronii reprezintă exemplele cele mai obișnuite. Sarcinile quarkurilor  $d$  și  $u$  se combină pentru a da +1 pentru proton și 0 pentru neutron. Faptul că protonul și neutronul se compun din niște particule cu sarcină, care se mișcă în interiorul lor, ne oferă un indiciu în legătură cu motivul pentru care protonul are un moment magnetic mai mare ca 1, iar neutronul, care se presupune a fi neutru, prezintă moment magnetic în primă instanță.

ceva numit „gluoni”.<sup>4</sup> Gluonii constituie un exemplu de alt gen de particulă cu „spin 1” (la fel ca fotonii); ei se deplasează dintr-un punct în altul cu o amplitudine ce se determină cu exact aceeași formulă ca pentru fotoni,  $F(\text{de la } A \text{ la } B)$ . Amplitudinea corespunzătoare emiterii sau absorbției gluonilor de către quarkuri este un misterios număr  $g$ , mult mai mare decât  $j$  (a se vedea Figura 81).

Diagramele pe care le trasăm pentru a reprezenta quarkuri schimbând gluoni sunt foarte asemănătoare cu cele pe care le desenăm pentru electroni schimbând fotoni (a se vedea Figura 82). Atât de asemănătoare,

---

<sup>4</sup> Observați numele: „foton” vine de la cuvântul grecesc care înseamnă lumină; „electron” vine de la cuvântul grecesc care înseamnă chihlimbar, substanța la care s-au observat prima dată proprietăți electrice. Dar, pe măsură ce fizica a progresat, s-a manifestat o scădere a interesului pentru numirea particulelor cu cuvinte din greaca veche, și s-a ajuns la cuvinte precum „gluoni”. Vă dați seama de ce le zice așa [*glue* = *lipici*, în limba engleză, în original (n.t.)]. În fapt, numele  $d$  și  $u$  provin și ele tot din cuvinte englezești, dar n-aș vrea să vă dezorientez – un quark  $d$  nu este prin nimic mai „jos” [*down*, în limba engleză, în original (n.t.)], la fel cum unul  $u$  nu este prin nimic mai „sus” [*up*, în limba engleză, în original (n.t.)]. Pentru că tot a venit vorba,  $d$ -imea ori  $u$ -imea poartă numele de „arome” ale quarkului.

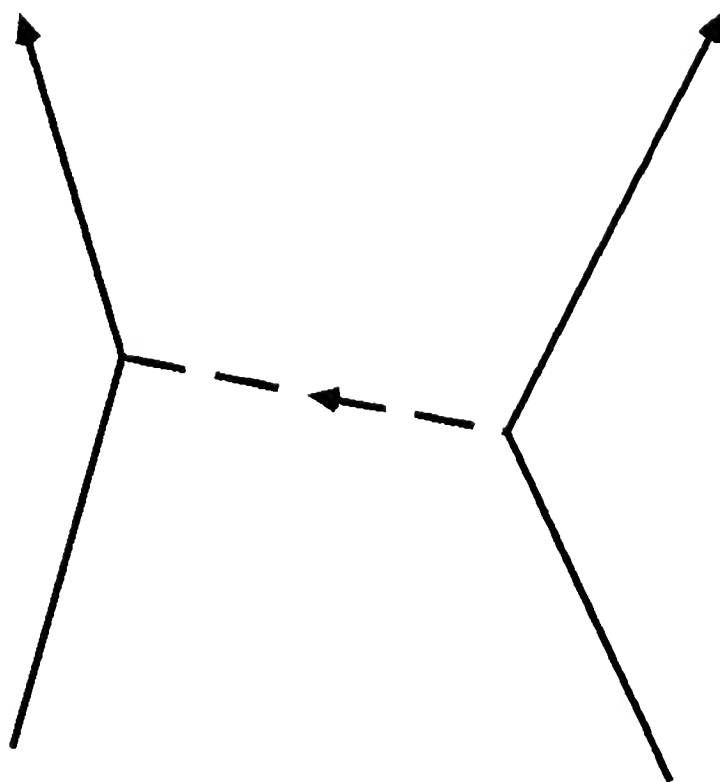


		particule cu spin 1	
		particule cu spin 1/2	
		foton	gluon
		0	0
<div><div>nume</div><div>electron</div><div>simbol</div><div><b>e</b></div><div>masa (MeV)</div><div>0,511</div></div>	electron	-1	0
		0	0
	quark	-1/3	g
	quark	+2/3	g
		cuplări	

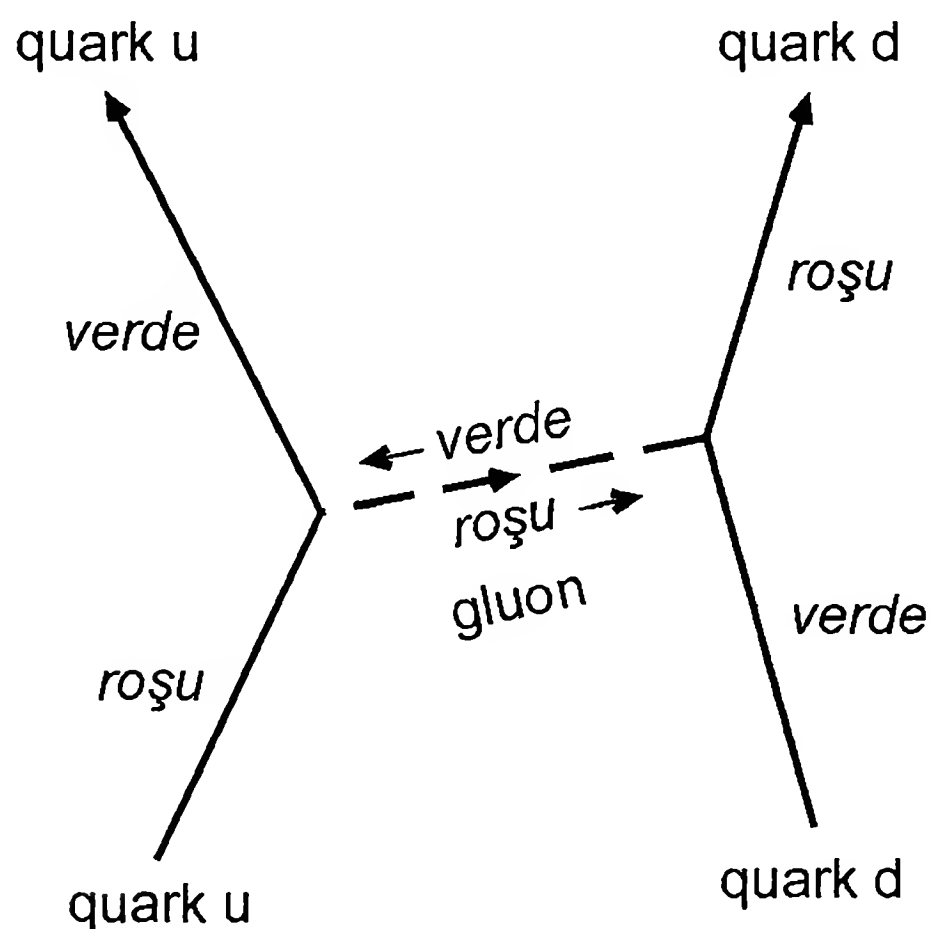
**Figura 81.** „Gluonii“ mențin quarkurile laolaltă pentru a alcătui protoni și neutroni, și dau în mod indirect socoteală de faptul că protonii și neutronii stau împreună în nucleul atomic. Gluonii mențin quarkurile laolaltă prin forțe mult mai tari decât forțele electrice. Constanta de cuplare a gluonilor,  $g$ , este mult mai mare decât  $j$ , ceea ce face foarte dificilă calcularea termenilor ce includ cuplări: la momentul actual, cea mai mare precizie la care se poate spera este de doar 10%.

în fapt, încât ați putea spune că fizicienii sunt lipsiți de imaginație, că doar au copiat teoria electrodinamicii cuantice și au aplicat-o la interacțiunile tari! Și așa este: exact asta am făcut, dar cu un mic amendament. Quarkurile prezintă un tip suplimentar de polarizare, care nu are legătură cu geometria. Idioții de fizicieni, incapabili să mai vină cu vreun minunat cuvânt grecesc, au denumit acest tip de polarizare cu termenul nefericit de „culoare“, termen ce nu are nici o legătură cu ceea ce înțelegem noi în mod normal prin cuvântul culoare. La un moment de timp dat, un quark se poate găsi în una din următoarele





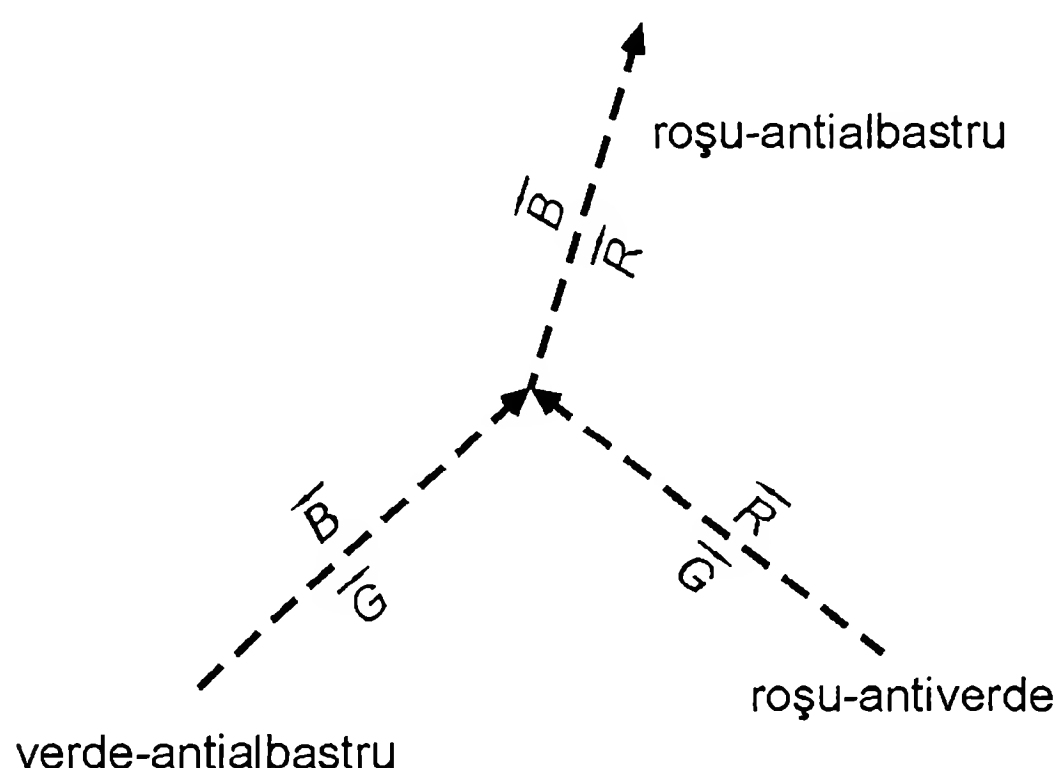
**Figura 82.** Diagrama uneia din modalitățile în care două quarkuri pot schimba un gluon între ele este atât de asemănătoare cu diagrama a doi electroni schimbând un foton, încât ați putea crede că fizicienii pur și simplu au copiat teoria electrodinamicii cuantice și au aplicat-o la „interacțiunile tari” care mențin laolaltă quarkurile în interiorul protonilor și neutronilor. Ei bine, asta au făcut... aproximativ.



**Figura 83.** Teoria gluonilor diferă de electrodinamică prin faptul că ei se cuplează cu niște chestii care sunt „colorate” (și care se pot afla în una din stările „roșu”, „verde” sau „albastru”). În exemplul de față, un quark  $u$  roșu se transformă în unul verde, emițând un gluon roșu-antiverde, ce este absorbit de un quark  $d$  verde, care devine roșu. (În cazul în care „culoarea” este transportată înapoi în timp, ea primește prefixul „anti“.)

trei situații, sau „culori”: R, G, sau B (ghiciți de la ce vine?) [*Red, Green, Blue* = *Roșu, Verde, Albastru*, în limba engleză, în original (n.t.)]. Culoarea quarkului se poate schimba atunci când el emite sau absoarbe un gluon. Gluonii sunt de opt feluri, în funcție de „culorile” cu care se cuplează. De exemplu, dacă un quark roșu se transformă în verde, el emite un gluon roșu-antiverde – un gluon care îi ia quarkului roșeața și îi dă verzeală („antiverde” vrea să spună că gluonul transportă verzeală în direcție opusă). Acest gluon ar putea fi absorbit de un quark verde, care s-ar încărca astfel cu roșu (a se vedea Figura 83). Există opt posibili gluoni diferiți, cum ar fi roșu-antiroșu, roșu-antiverde, roșu-antialbastru și așa mai departe (ați fi înclinați să credeți că ar trebui să fie nouă, însă, din motive tehnice, unul lipsește). Teoria nu este foarte complicată. Întreaga regulă referitoare la gluoni este atât: gluonii se cuplează cu niște chestii „colorate” – nu este nevoie decât de puțină contabilitate, pentru a ține socoteala „culorilor”.

Există, totuși, o posibilitate interesantă generată de această regulă: gluonii se pot cupla cu alți gluoni (a se vedea Figura 84). De pildă, un gluon verde-antialbastru, întâlnindu-se cu unul roșu-antiverde, generează un gluon roșu-antialbastru. Teoria gluonilor este foarte simplă: pur și simplu, trasați diagramele și urmăriți „culorile”. Pentru toate diagramele, tăria cuplărilor se determină pe baza constantei de cuplare a gluonilor,  $g$ .



**Figura 84.** Din moment ce gluonii sunt ei înșiși „colorați”, ei se pot cupla între ei. În exemplul de față, un gluon verde-antialbastru se cuplează cu unul roșu-antiverde, pentru a forma un gluon roșu-antialbastru. Teoria gluonilor este ușor de înțeles: pur și simplu, urmăriți „culorile”.

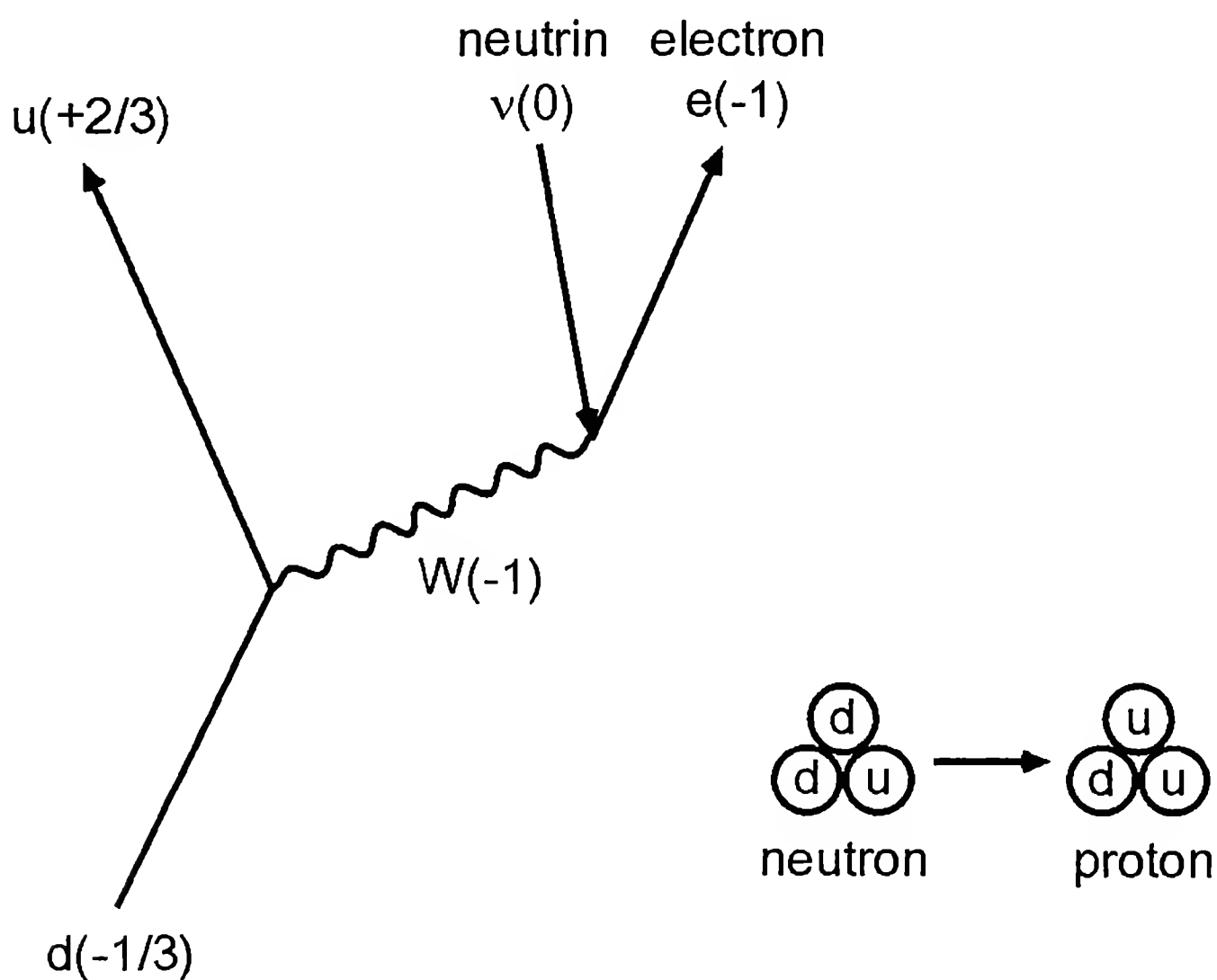
Teoria gluonilor nu este, într-adevăr, prea mult diferită de electrodinamica cuantică. De exemplu, cât de mult concordă valoarea observată a momentului magnetic al protonului, cu cea calculată cu ajutorul teoriei?

Experimentele sunt foarte precise; ele indică pentru momentul magnetic valoarea 2,79273. În cel mai bun caz, teoria poate veni cu un 2,7, plus sau minus 0,3 – asta dacă ești suficient de optimist în privința preciziei calculelor tale – aceasta însemnând o eroare de 10%, adică de 10.000 de ori mai puțin exactă decât experimentul! Dispunem de o teorie simplă, bine precizată, care se presupune că ar explica toate proprietățile protonilor și neutronilor, și totuși nu putem calcula nimic cu ea, din cauză că matematica implicată este prea grea pentru noi. (Cred că puteți bănuși la ce anume lucrez actualmente și nu ajung la niciun rezultat.) Motivul pentru care nu putem face calcule cu oricâtă precizie este valoarea mult mai mare a constantei de cuplare pentru gluoni,  $g$ , decât a celei corespunzătoare electronilor. Termenii cu două, patru, sau chiar cu șase cuplări, nu reprezintă doar niște corecții minore la amplitudinea principală, ci constituie contribuții semnificative, ce nu pot fi ignorate. Ca atare, există săgeți corespunzătoare atât de multor posibilități, încât nu am fost în stare să le organizăm de o manieră rezonabilă pentru a găsi cât este săgeata finală.

În cărți scrie că știința este simplă: construiești o teorie și o compari cu experimentul; dacă teoria nu merge, o arunci și construiești alta. În situația de față avem o teorie bine precizată și dispunem de sute de experimente, dar nu le putem compara! Este o situație care nu a mai existat vreodată în fizică. Suntem blocați, pentru moment, de incapacitatea de a veni cu o metodă de calcul. Suntem îngropați sub mulțimea de săgetuțe.

În ciuda dificultăților de calcul ale teoriei, din punct de vedere calitativ înțelegem anumite lucruri legate de cromodinamică (de interacțiunile tari ale quarkurilor și gluonilor). Obiectele pe care le vedem că sunt alcătuite din quarkuri, sunt „colorate” neutru: avem grupuri de câte trei quarkuri, câte unul de fiecare „culoare”, iar perechile quark-antiquark au amplitudini egale de a fi roșu-antiroșu, verde-antiverde, ori albastru-antialbastru. Înțelegem, de asemenea, motivul pentru care quarkurile nu pot fi produse ca particule individuale – din ce cauză anume, indiferent de cât de multă energie se folosește pentru izbirea unui nucleu cu un proton, în loc să vedem sărind quarkuri individuale, observăm o jerbă de mezoni și barioni (perechi quark-antiquark și grupuri de trei quarkuri).

Cromodinamica cuantică și electrodinamica cuantică nu epuizează fizica. Potrivit lor, un quark nu-și poate schimba „aroma”: ce este quark  $u$ , quark  $u$  rămâne; ce este quark  $d$ , quark  $d$  rămâne. Însă, uneori, natura se comportă diferit. Există o formă de radioactivitate ce se desfășoară lent – genul de radioactivitate de care lumea se teme să nu scape din cadrul reactoarelor nucleare – numită dezintegrare beta. Ea implică transformarea unui neutron în proton. Cum neutronul constă din două quarkuri de tip  $d$  și unul de tip  $u$ , în vreme ce protonul constă din două quarkuri  $u$  și unul  $d$ , înseamnă că ceea ce se întâmplă propriu-zis este schimbarea unui quark de tip  $d$  al neutronului într-un quark de tip  $u$  (a se vedea Figura 85). Iată cum se întâmplă aceasta: quarkul  $d$  emite o chestie mică, asemenea unui foton, numită  $W$ , care se cuplează cu un electron și cu încă o nouă particulă, numită anti-neutrino – un neutrino mergând înapoi în timp. Neutrino reprezintă o altă particulă de tipul celor cu spin  $1/2$  (precum electronul și quarkurile), dar nu are masă și sarcină (nu interacționează cu fotonii). De asemenea, el nu interacționează nici cu gluonii; doar se cuplează cu  $W$  (a se vedea Figura 86).



**Figura 85.** Atunci când un neutron se dezintegrează într-un proton (un proces numit „dezintegrare beta”), singurul lucru care se schimbă este „aroma” unuia din quarkuri. Acest proces se desfășoară relativ lent, așa încât a fost propusă o particulă intermediară (numită „boson intermediar  $W$ ”) cu masă foarte mare (aproximativ 80.000 MeV) și sarcină  $-1$ .

nume

simbol

masa (MeV)

electron

**e**

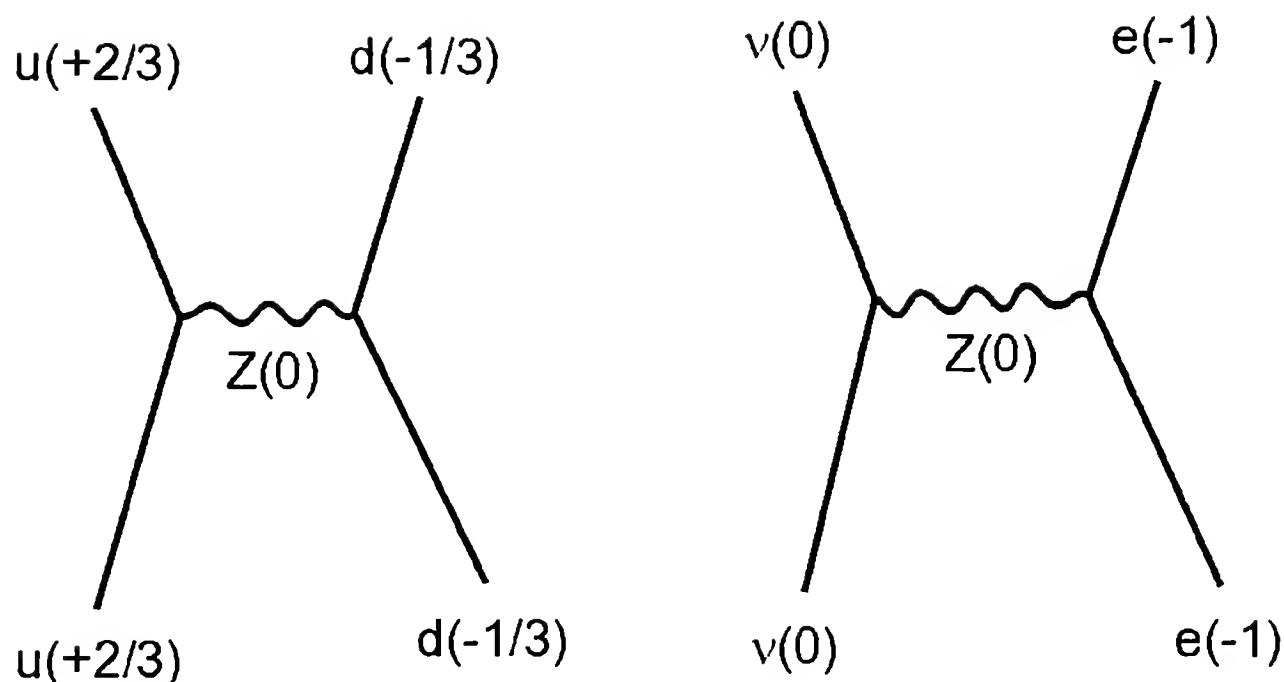
0,511

	particule cu spin 1/2	particule cu spin 1		
		foton	gluon	W
		0	0	~80000
electron	<b>e</b> 0,511	-1	0	↩
neutrin	<b>ν<sub>e</sub></b> 0	0	0	↩
quark	<b>d</b> ~10	-1/3	g	↩
quark	<b>u</b> ~10	+2/3	g	↩
		cuplări		

**Figura 86.** Bosonul W se cuplează pe de o parte cu electronul și neutrinel, iar pe de altă parte cu quarkurile *d* și *u*.

W este o particulă de tipul celor cu spin 1 (precum fotonul și gluonii), care modifică „aroma” unui quark și îi preia sarcina: quarkul *d*, cu sarcina  $-1/3$ , se transformă în quark *u*, cu sarcina  $+2/3$ , diferența fiind de  $-1$ . (El nu schimbă „culoarea” quarkului.) Din cauza faptului că  $W_-$  preia sarcina  $-1$  (iar antiparticula sa corespunzătoare,  $W_+$ , preia sarcina  $+1$ ), el se poate cupla și cu un foton. Dezintegrarea beta durează mult mai mult decât interacțiunile fotonilor și electronilor, fapt pentru care se crede că W, spre deosebire de fotoni și electroni, trebuie să aibă o masă foarte mare (circa 80.000 MeV). Din cauza energiei foarte înalte necesare pentru a elibera o particulă cu masă atât de mare, nu am fost capabili să observăm vreun W de sine stătător.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> După susținerea acestor prelegeri, s-au realizat energii suficient de înalte pentru a produce un W de sine stătător, iar masa sa măsurată experimental s-a dovedit foarte apropiată de valoarea prezisă de teorie.

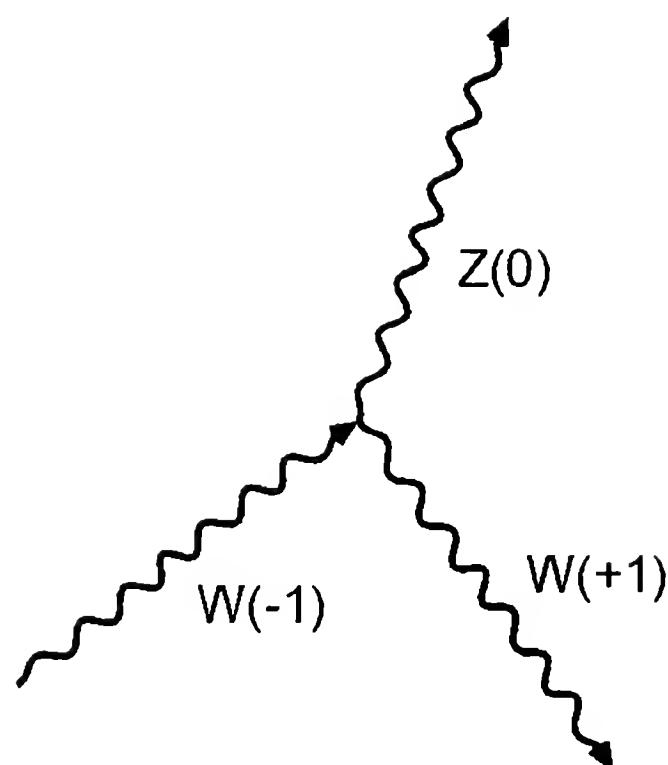


**Figura 87.** Atunci când nu se înregistrează nicio schimbare a sarcinii niciunei particule, W-ul nu are nici el sarcină (el este numit în acest caz  $Z_0$ ). Astfel de interacțiuni sunt numite „curenți neutri”. Pe desen sunt prezentate două asemenea posibilități.

Există o altă particulă, pe care am putea-o gândi drept un W neutru, numită  $Z_0$ .  $Z_0$  nu modifică sarcina unui quark, dar se poate cupla cu un quark  $d$ , cu un quark  $u$ , cu un electron, sau cu un neutrino (a se vedea Figura 87). Această interacțiune poartă înșelătorul nume de „curenți neutri”, iar descoperirea ei în urmă cu câțiva ani a produs multă agitație.

Dacă se admite posibilitatea unei cuplări triple între trei tipuri de W-uri (a se vedea Figura 88), teoria W-urilor iese simplă și drăguță. Constanta de cuplare măsurată pentru W-uri este în mare măsură aceeași ca pentru foton – undeva în jurul valorii  $j$ . În consecință, există posibilitatea ca cele trei W-uri și fotonul să reprezinte aspecte diferite ale aceluiași lucru. Stephen Weinberg și Abdus Salam au încercat să combine electrodinamica cuantică cu ceea ce numim „interacțiunile slabe” (interacțiunile cu W-uri) într-o singură teorie cuantică, și au reușit. Dar dacă pur și simplu privești rezultatele pe care ei le obțin, poți sesiza ața albă, ca să spunem așa. Este foarte clar că fotonul și cei trei W sunt cumva interconectați, dar, la nivelul actual de înțelegere, este greu de văzut limpede legătura – încă se mai văd „însăilările” între teorii, nu s-a reușit netezirea cusăturilor într-atât încât îmbinarea să devină mai frumoasă și, în consecință, probabil mai corectă.

Deci, situația se prezintă astfel: teoria cuantică are trei tipuri principale de interacțiuni – „interacțiunile tari” ale quarkurilor și gluonilor, „interacțiunile slabe” ale W-urilor, și „interacțiunile electrice” ale fotonilor. Singurele particule din lume (potrivit acestei viziuni) sunt quarkurile (cu „aromele”  $u$  și  $d$ , fiecare cu câte trei „culori”), gluonii (opt combinații de R, G și B), W-urile (cu sarcinile  $\pm 1$  și 0), neutrino, și electronii.



**Figura 88.** Este posibilă o cuplare între un  $W_{-1}$ , antiparticula sa (un  $W_{+1}$ ) și un  $W$  neutru ( $Z_0$ ). Constanta de cuplare pentru  $W$ -uri are valoare apropiată de  $j$ , aceasta sugerând că  $W$ -urile și fotonii ar putea fi aspecte diferite ale aceluiași lucru.

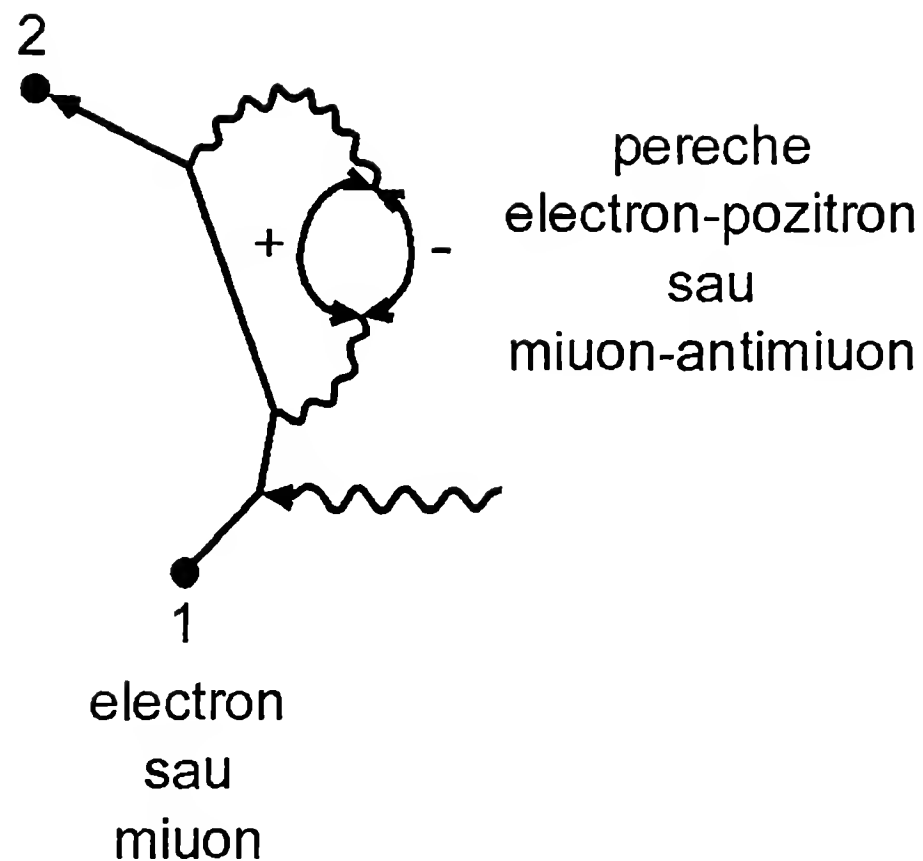
electronul și fotonul – aproximativ douăzeci de particule distincte, de șase tipuri diferite (plus antiparticulele lor). În jur de douăzeci de particule diferite, nu e prea rău... numai că nu e totul.

Pe măsură ce nucleele au fost bombardate cu protoni la energii din ce în ce mai mari, au continuat să apară noi particule. O astfel de particulă este miuonul, care este în toate privințele la fel ca electronul, cu singura deosebire că are masa mult mai mare – 105,8 MeV, față de 0,511 MeV, cât are electronul; altfel spus, este de circa 206 ori mai greu. Este ca și când Dumnezeu ar fi vrut pur și simplu să încerce altă valoare a masei! Toate proprietățile miuonului pot fi complet descrise de teoria electrodinamicii: constanta de cuplare este aceeași,  $j$ , iar  $E$  (de la A la B) este și ea aceeași; doar trebuie introdusă o altă valoare pentru  $n$ .<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Momentul magnetic al miuonului a fost măsurat cu mare exactitate, și s-a găsit că el are valoarea 1,001165924 (cu o imprecizie de 9 pentru ultima zecimală), în vreme ce pentru electron el este egal cu 1,00115965221 (cu o imprecizie de 3 pentru ultima zecimală). S-ar putea să fiți curioși în privința motivului pentru care momentul magnetic al miuonului este un pic mai mare decât cel al electronului. În una din diagramele pe care le-am desenat, un electron emitea un foton, care se dezintegrează într-o pereche pozitron-electron (a se vedea Figura 89). Există o mică amplitudine ca fotonul emis să producă o pereche miuon-antimiuon, care este mai grea decât electronul original. Acest lucru este asimetric, deoarece atunci când miuonul emite un foton, dacă acel foton generează o pereche pozitron-electron, aceștia din urmă sunt *mai ușori* decât miuonul original. Teoria electrodinamicii cuantice descrie cu exactitate *orice* proprietate electrică, atât a miuonilor, cât și a electronilor.

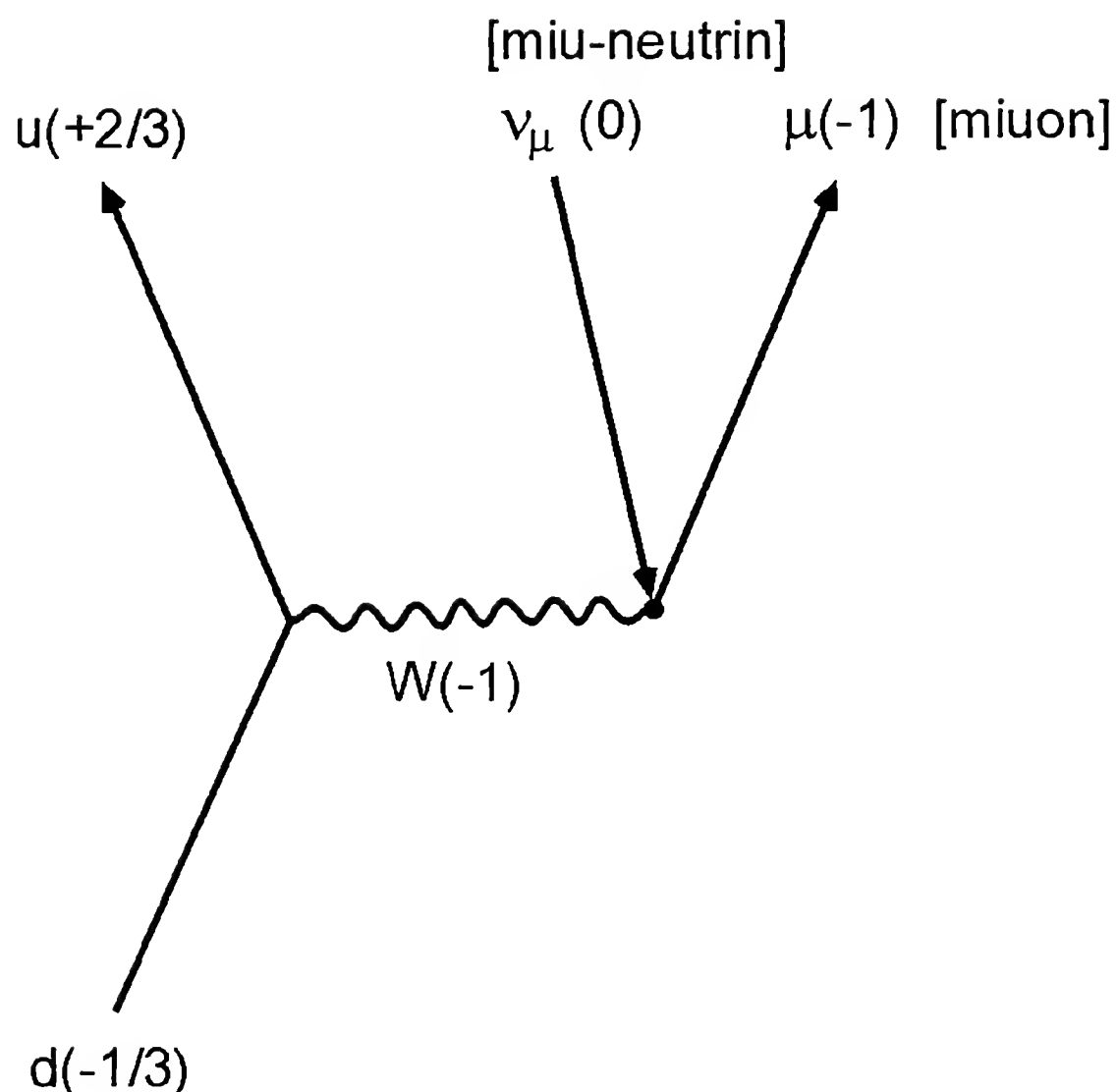




**Figura 89.** În procesul de bombardare a nucleelor cu protoni la energii din ce în ce mai înalte, apar noi particule. Una din aceste particule este miuonul, sau electronul greu. Teoria care descrie interacțiunile miuonului este exact aceeași ca pentru electron, cu excepția faptului că în  $E$  (de la  $A$  la  $B$ ) se ia o valoare mai mare pentru  $n$ . Momentul magnetic al miuonului ar trebui să fie un pic diferit de cel al electronului, din cauza unei alternative anume: atunci când electronul emite un foton ce se dezintegrează într-o pereche electron-pozitron sau într-o pereche miuon-antimiuon, dezintegrarea dă naștere unei perechi de particule cu masă apropiată sau mult mai mare decât a electronului original. Pe de altă parte, atunci când un *miuon* emite un foton ce se dezintegrează într-o pereche miuon-antimiuon sau într-o pereche pozitron-electron, dezintegrarea dă naștere unei perechi de particule cu masă apropiată sau *mult mai mică* decât a miuonului original. Experimentele confirmă această mică diferență.

Din cauza faptului că miuonul are o masă de aproximativ 200 de ori mai mare decât electronul, „acul cronometrului” se rotește pentru miuon de 200 de ori mai repede decât pentru electron. Acest lucru ne-a permis să verificăm dacă electrodinamica se mai comportă potrivit teoriei și la distanțe de 200 de ori mai mici decât cele pe care le puteam testa anterior – asta chiar dacă distanțele respective încă sunt cu peste optzeci de cifre zecimale mai mari decât distanțele la care teoria în sine ar da de bucluc cu infinitii (a se vedea nota de subsol de la pagina 141).

Am văzut că un electron se poate cupla cu un  $W$  (a se vedea Figura 85). Atunci când un quark  $d$  se transformă într-un quark  $u$ ,



**Figura 90.**  $W$ -ul prezintă o anumită amplitudine de emiterie a unui miuon, în locul emiterii unui electron. În acest caz, locul neutrinelui obișnuit este luat de un miu-neutrino.

emițând un  $W$ , este oare posibil ca  $W$ -ul să se cupleze cu un miuon în loc de un electron? Da (a se vedea Figura 90). Și cum rămâne atunci cu antineutrino? În cazul cuplării  $W$ -ului cu un miuon, locul neutrino-ului obișnuit este luat de o particulă numită miu-neutrino. Deci tabelul nostru conține acum două noi particule, pe lângă electron și neutrino: miuonul și miu-neutrino.

Și cum rămâne cu quarkurile? Foarte de timpuriu, s-a știut că trebuia ca unele particule să fie alcătuite din quarkuri mai grele decât  $u$  sau  $d$ . Astfel, pe lista particulelor fundamentale a fost inclus un al treilea quark, numit  $s$  (de la „straniu”). Quarkul  $s$  are o masă de aproximativ 200 MeV, spre deosebire de 10 MeV, cât au quarkurile  $u$  și  $d$ .

Timp de mulți ani s-a crezut că există doar trei „arome” de quarkuri –  $u$ ,  $d$  și  $s$  – dar, în 1974, a fost descoperită o nouă particulă, numită mezon psi, care nu putea fi alcătuită din cele trei quarkuri. De asemenea, exista și un argument teoretic foarte puternic pentru faptul că trebuia să mai fie și un al patrulea quark, care să se cupleze cu quarkul  $s$  prin intermediul unui  $W$ , în aceeași manieră ca  $u$  și  $d$  (a se vedea

nume

simbol

masa (MeV)

electron	<b>e</b>	0,511
----------	----------	-------

		particule cu spin 1		
		foton	gluon	W
		0	0	~80000
particule cu spin 1/2				
miuon	electron	-1	0	↩
<b>μ</b>	<b>e</b>			
105,8	0,511			
neutrīn	neutrīn	0	0	↩
<b>ν<sub>μ</sub></b>	<b>ν<sub>e</sub></b>			
0	0			
quark	quark	-1/3	g	↩
<b>s</b>	<b>d</b>			
~200	~10			
quark	quark	+2/3	g	↩
<b>c</b>	<b>u</b>			
~1800	~10			

cuplări

**Figura 91.** Natura pare să repete particulele cu spin 1/2. Pe lângă miuon și miu-neutrīn, există două noi quarkuri – s și c – care au aceeași sarcină dar mase mai mari decât corespondentele lor din coloana vecină.

Figura 91). „Aroma” acestui quark se numește c, și nu îndrăznesc să vă spun de la ce cuvânt provine, dar probabil că veți fi citit prin reviste [*charmed* = *vrăjit*, în engleză, în original (n.t.)]. Numele devin din ce în ce mai neinspirate!

Această repetare de particule cu aceleași proprietăți dar cu mase mai mari este un complet mister. Ce-i cu această ciudată dedublare a tiparelor? Sau, cum a spus profesorul I. I. Rabi, atunci când a fost descoperit miuonul: „Cine a comandat asta?”

Recent, a început o nouă repetare a acestei liste. Pe măsură ce ne îndreptăm către energii din ce în ce mai înalte, Natura pare să tot îngrămădească astfel de particule, de parcă ar vrea să ne năucească. Sunt nevoit să vă vorbesc despre ele deoarece doresc să vedeți cât de manifest complicată arată lumea cu adevărat. Ar fi foarte înșelător să

nume

simbol

masa (MeV)

electron	<b>e</b>	0,511
----------	----------	-------

particule cu spin 1/2			particule cu spin 1		
tau	miuon	electron	foton	gluon	W
$\tau$	$\mu$	<b>e</b>	0	0	~80000
~1860	105,8	0,511	-1	0	
neutrin	neutrin	neutrin			
$\nu_\tau$	$\nu_\mu$	$\nu_e$	0	0	
0	0	0			
quark	quark	quark			
<b>b</b>	<b>s</b>	<b>d</b>	-1/3	g	
~4800	~200	~10			
	quark	quark			
	<b>c</b>	<b>u</b>	+2/3	g	
	~1800	~10			

cuplări

**Figura 92.** O luăm de la capăt! A început o nouă repetare a particulelor cu spin 1/2, la energii încă și mai înalte. Această repetare se va încheia dacă se va descoperi vreo particulă cu proprietăți de asemenea natură încât să implice existența unei noi arome de quark. Între timp, se desfășoară pregătiri pentru căutarea începutului încă unei repetări, la energii încă și mai înalte. Cauza acestor repetări constituie un absolut mister.

vă las impresia că dacă am rezolvat 99% din fenomenele lumii cu ajutorul electronilor și fotonilor, restul de 1% din fenomene necesită cu 1% mai multe particule! Se dovedește că pentru a explica acest ultim 1%, ne trebuie de zece sau de douăzeci de ori mai multe particule suplimentare.

Deci, o luăm de la capăt: prin folosirea în experimente a unor energii încă și mai mari, a fost descoperit un electron încă și mai greu, numit „tau”; el are o masă de aproximativ 1800 MeV, fiind greu cât doi protoni! S-a avansat, de asemenea, și ideea existenței unui tau-neutrin. Iar acum s-a descoperit o particulă dubioasă, care implică existența unei „arome” noi de quark – de data aceasta este vorba de „b”, de la

„beauty“ [*frumusețe*, în limba engleză, în original (n.t.)] - și care are sarcina  $-1/3$  (a se vedea Figura 92). Acum aș dori să deveniți pentru o clipă fizicieni de înaltă clasă în domeniul teoriei fundamentale, și să preziceți ceva: va fi descoperită o nouă aromă de quark, numită „\_\_“ (de la „\_\_“), cu sarcina \_\_ și masa \_\_ MeV... iar noi avem în mod cert speranța că ea există *cu adevărat*.<sup>7</sup>

Între timp, se efectuează experimente pentru a vedea dacă ciclul se repetă din nou. În clipa de față, se construiesc mașinării cu care să se caute un electron încă și mai greu decât tau. Dacă masa acestei presupuse particule este de vreo 100.000 MeV, ea nu va putea fi produsă. Dacă însă este undeva în jurul a 40.000 MeV, s-ar putea ca ea să fie realizabilă.

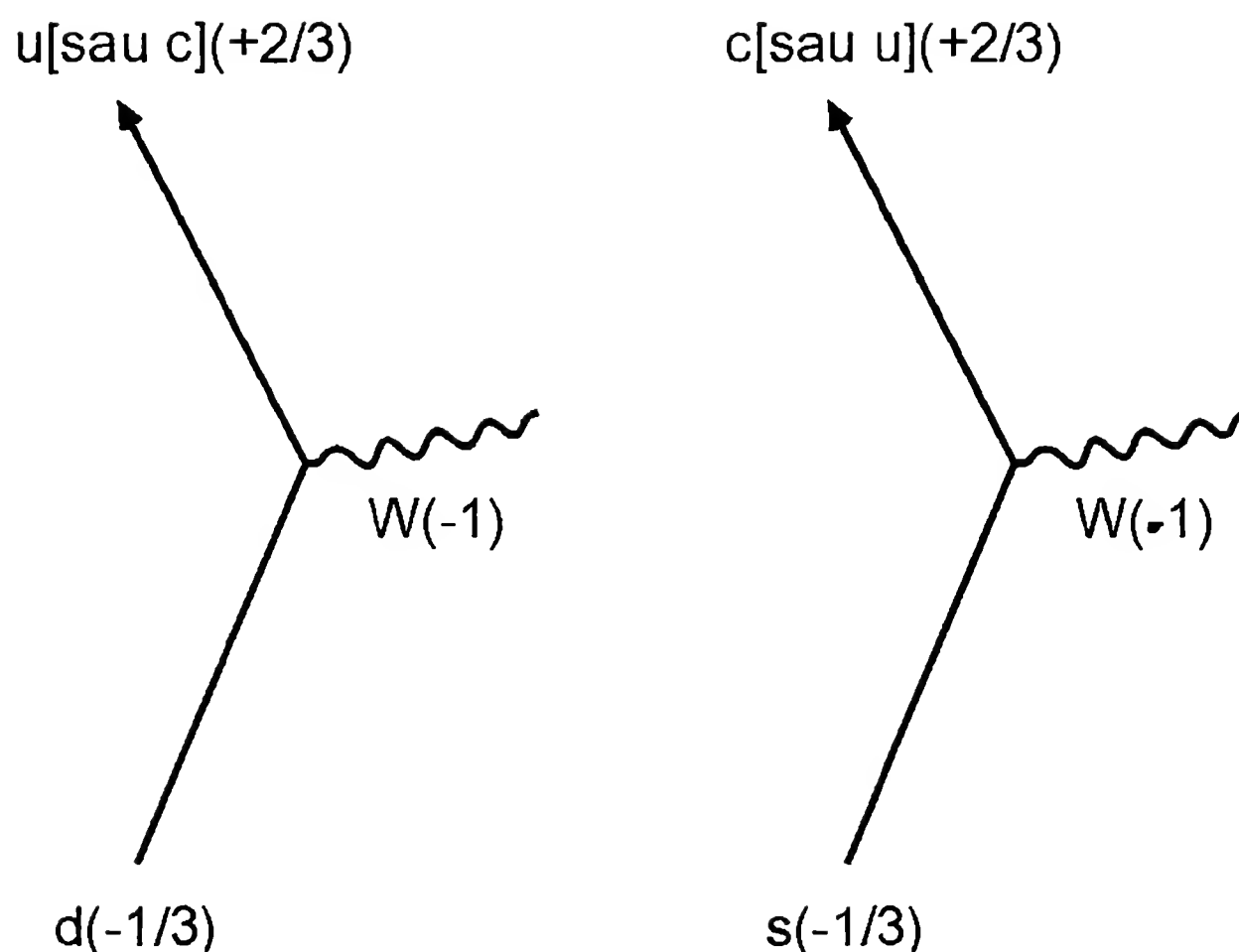
Astfel de mistere fac foarte interesantă meseria de fizician teoretician: Natura ne confruntă cu puzzle-uri atât de minunate! De ce oare repetă Ea electronul pentru mase de 206 și respectiv de 3640 de ori mai mari?

Pentru a încheia pe de-a-ntregul cu particulele, aș dori să mai fac o ultimă remarcă. Atunci când un quark  $d$  se transformă într-un quark  $u$ , printr-o cuplare cu un  $W$ , el prezintă de asemenea o mică amplitudine de a se transforma într-un quark  $c$ . Atunci când un quark  $u$  se transformă într-un quark  $d$ , el prezintă de asemenea o mică amplitudine de a se transforma într-un quark  $s$ , și încă o și mai mică amplitudine de a se transforma într-un quark  $b$  (a se vedea Figura 93). Prin urmare,  $W$ -ul „o dă în bară“ un pic, și permite quarkurilor să treacă dintr-o coloană a tabelului în alta. Motivul pentru care amplitudinile quarkurilor de transformare dintr-un tip în altul se află în acest raport, este absolut necunoscut.

Așadar, acesta este tot restul fizicii cuantice. E o amestecătură cumplită, și ați putea spune că fizica s-a băgat într-o încurcătură fără ieșire. Dar așa a arătat ea dintotdeauna. Natura a arătat mereu ca o încurcătură cumplită, însă, pe măsură ce mergeam mai departe, observam tipare și puneam teorii cap la cap: apărea o anumită limpezire și lucrurile deveneau mai simple. Încurcătura pe care tocmai v-am prezentat-o este mult mai mică decât încurcătura cu care a trebuit să avem de-a face acum zece ani, când ar fi trebuit să vă spun despre mai mult de o sută de particule. Și gândiți-vă la încurcătura de la începutul

---

<sup>7</sup> După susținerea acestor prelegeri, au fost descoperite unele dovezi în favoarea existenței unui quark  $t$ , cu masă extrem de mare - în jur de 40.000 MeV.



**Figura 93.** Un quark  $d$  prezintă o mică amplitudine de a se transforma într-un quark  $c$ , în loc de a se transforma într-un quark  $u$ , iar un quark  $s$  prezintă o mică amplitudine de a se transforma într-un quark  $u$ , în loc de a se transforma într-un quark  $c$ , în ambele situații emițându-se un  $W$ . Prin urmare,  $W$ -ul pare a avea capacitatea de a modifica aroma unui quark, dintr-o coloană a tabelului în alta (a se vedea Figura 92).

acestui secol, când existau fenomene termice, fenomene magnetice, fenomene electrice, fenomene optice, raze X, raze ultraviolete, indici de refracție, coeficienți de reflexie, și alte proprietăți ale diferitelor substanțe, pe care de atunci le-am strâns pe toate într-o singură teorie, electrodinamica cuantică.

Aș dori să subliniez un lucru. Teoriile referitoare la restul fizicii sunt foarte asemănătoare cu teoria electrodinamicii cuantice: ele implică toate interacțiunea obiectelor cu spin  $1/2$  (precum electronii și quarkurile) cu obiecte cu spin  $1$  (precum fotonii, gluonii, ori  $W$ -urile), în cadrul conceptual al amplitudinilor. În acest cadru, probabilitatea unui eveniment este pătratul lungimii unei săgeți. Din ce motiv toate teoriile fizicii au o structură atât de asemănătoare?

Există un număr de posibilități. Prima ar fi imaginația limitată a fizicienilor: atunci când observăm un fenomen nou, încercăm să-l încadrăm în sistemul conceptual de care dispunem deja – până ce nu vom fi făcut suficiente experimente, nu vom fi știind că treaba nu ține. Așa încât, atunci când un nebun de fizician susține o prelegere la UCLA,

în anul 1983, și rostește „așa stau lucrurile, și priviți cât de minunat se aseamănă teoriile“, asta nu înseamnă că Natura este *cu adevărat* asemănătoare, ci că fizicienii nu au fost în stare decât să se gândească la același afurisit de lucru, iar și iar.

O altă posibilitate ar fi ca *într-adevăr să fie* același afurisit de lucru iar și iar – ca Natura să aibă doar o singură manieră de a face lucrurile, și să se repete din vreme în vreme.

O a treia posibilitate ar fi ca lucrurile să arate asemănător din cauză că ele constituie aspecte ale unui același lucru – ale unei viziuni mai largi aflate la bază, din care se despart chestii ce arată diferit, precum degetele de la o mână. Mulți fizicieni lucrează din greu în încercarea de a construi o viziune amplă, care să unifice totul în cadrul unui model supermeseriaș. Este un joc minunat, dar în momentul de față niciunul din cei care fac speculații nu cade de acord cu niciun altul în privința a cum arată această amplă viziune. Atunci când afirm că majoritatea acestor teorii speculative nu au cu nimic mai multă profunzime logică decât ghicitul dumneavoastră în legătură cu posibila existență a unui quark  $t$ , nu exagerez decât cu foarte puțin: vă garantez că fizicienii nu se pricep cu nimic mai bine ca dumneavoastră la ghicitul masei quarkului  $t$ !

De exemplu, se vedește că electronul, neutrinelul, quarkul  $d$  și quarkul  $u$  se potrivesc toate între ele – într-adevăr, primele două se cuplează cu  $W$ -ul, la fel ca și ultimele două. Actualmente se crede că un quark își poate schimba doar „culoarea“ și „aroma“. Dar poate că un quark s-ar putea dezintegra într-un neutrino, prin cuplare cu vreo particulă nedescoperită. Drăguță idee. Ce s-ar întâmpla atunci? Ar însemna că protonii sunt instabili.

Vine cineva și avansează o idee: protonul este instabil. Se fac calcule și se găsește că în Univers n-ar mai trebui să existe protoni! Așa încât el mai suferă numerele, și introduce o valoare mai mare pentru masa noii particule. După mult efort, se face predicția că protonul se dezintegrează într-un ritm cu puțin mai lent decât cel mai recent ritm cu care s-a observat experimental că protonul nu se dezintegrează.

Atunci când se realizează un nou experiment, în care proprietățile protonului sunt măsurate cu mai multă precizie, teoriile sunt ajustate pentru a scăpa din strâmtoare. Cel mai recent experiment a arătat că protonul nu se dezintegrează nici cu un ritm de cinci ori mai lent decât cel prezis de *ultima versiune* a teoriilor. Ce credeți că s-a întâmplat? Pasărea Phoenix a renăscut, și teoria a fost modificată din nou, astfel încât să necesite experimente încă și mai precise pentru



verificarea ei. Nu se știe dacă protonul se dezintegrează sau nu. Este foarte dificil de demonstrat că el nu se dezintegrează.

Pe parcursul tuturor acestor prelegeri, nu am discutat despre gravitație. Motivul este acela că influența gravitației asupra obiectelor este *extrem de mică*: este vorba de o forță mai slabă decât forța electrică dintre doi electroni printr-un factor de 1 urmat de 40 de zerouri (posibil 41 de zerouri). În cadrul materiei, forțele electrice servesc aproape în întregime la menținerea electronilor în apropierea nucleului din atomul respectiv. Se creează astfel un amestec bine echilibrat de sarcini pozitive și negative, care se anulează reciproc. Dar în cazul gravitației, singura forță este de atracție, și ea continuă să sporească cu cât se adună laolaltă mai mulți atomi. În final, atunci când se ajunge la corpuri voluminoase precum ale noastre, putem începe să măsurăm efectele gravitației asupra noastră înșine, asupra planetelor, și așa mai departe.

Din cauza faptului că forța gravitațională este atât de slabă în comparație cu celelalte interacțiuni, la ora actuală este imposibil de realizat orice experiment care să fie atât de delicat încât să permită măsurarea vreunui efect necesitând precizia unei teorii cuantice pentru explicarea lui.<sup>8</sup> Chiar dacă nu există niciun mod în care să fie testate, există totuși teorii cuantice ale gravitației, care implică „gravitoni” (particule ce ar urma să figureze într-o categorie nouă de polarizare, numită „spin 2”) și alte particule fundamentale (dintre care unele cu spin 3/2). Cea mai bună dintre aceste teorii nu este în stare să includă particulele găsite, și inventează o grămadă de particule ce nu se găsesc. Teoriile cuantice ale gravitației au și ele infiniți în cadrul termenilor cu cuplări, însă „procedeul tembel” care funcționează în electrodinamica cuantică pentru a scăpa de infiniți, nu dă rezultate în cazul gravitației. Deci, nu numai că nu dispunem de experimente cu care să verificăm o teorie cuantică a gravitației, nu dispunem nici măcar de o teorie rațională.

\* \* \*

---

<sup>8</sup> Atunci când Einstein și alții au încercat să unifice gravitația cu electrodinamica, ambele teorii reprezentau niște aproximări clasice. Cu alte cuvinte, erau eronate. Niciuna din aceste teorii nu dispunea de cadrul conceptual al amplitudinilor, despre care știm astăzi că este necesar.

Pe parcursul întregii acestei povești, a rămas în mod special tratată nesatisfăcător o anumită caracteristică: masele observate experimental ale particulelor,  $m$ . Nu există nicio teorie care să explice în mod adecvat aceste valori. Folosim aceste numere în cadrul tuturor teoriilor noastre, dar nu le înțelegem – ce reprezintă ele, sau de unde provin. Cred că, din punct de vedere fundamental, aceasta constituie o problemă foarte interesantă.

Îmi pare rău dacă toate aceste speculații în legătură cu noi particule v-au derutat cumva, dar am decis să îmi întregesc discuția în legătură cu restul fizicii, pentru a vă arăta modul în care *caracterul* acestor legi – cadrul conceptual al amplitudinilor, diagramele reprezentând interacțiunile ce urmează a fi calculate, și așa mai departe – se dovedește a fi același cu cel pentru teoria electrodinamicii cuantice, cel mai bun exemplu de teorie corectă.

Notă adăugată la lectura de corectură a textului, noiembrie 1984:

De la susținerea acestor prelegeri, evenimente suspecte observate în cadrul unor experimente, par să facă posibilă descoperirea în curând a unor alte particule sau fenomene, noi și neașteptate (și, ca atare, nementionate în aceste prelegeri).

Notă adăugată la lectura de corectură a textului, aprilie 1985:

La ora de față, „evenimentele suspecte” menționate mai sus se dovedesc a fi o alarmă falsă. Până la vremea la care veți fi citind această carte, fără îndoială că situația se va fi modificat din nou. În fizică, lucrurile se schimbă mai rapid decât în activitatea editorială.



## INDEX

- acțiuni:  
    de bază, cele trei: 124;  
    fundamentale: 103,127;  
acustice, fenomene: 16;  
albă, lumina: 44, 115;  
amplitudine:  
    corespunzătoare cuplării: 104;  
    dată de  $F$ (de la A la B): 133;  
     $j$ : 134;  
    modificarea unghiului: 115;  
    pentru schimbul de fotoni: 112;  
    probabilităților: 42, 48;  
    săgeata: 79;  
Anderson, Carl: 111;  
apă, viteza luminii în: 61;  
„aromă”: 161;  
    quarkurilor: 146;  
atom(i):  
    de heliu: 127;  
    de hidrogen: 112, 127;  
    de litiu: 127;  
    de oxigen: 17;  
    de sodiu: 59;  
 $b$ , quarkul: 159;  
baloane de săpun: 42;  
barioni: 144;  
Bell Laboratories: 96;  
beta, dezintegrarea: 151, 155-6;  
Bethe, Hans: 140;  
bombă atomică: 143;  
 $c$ , quarkul: 159;  
 $c$  (viteza luminii): 99, 101-2;  
chimice, proprietăți: 126;  
chimie teoretică fundamentală: 17;  
ciclu repetat: 30, 42;  
colibri, păsările: 44;  
complexe, numere: 75;  
compuse, evenimente: 71;  
condiții:  
    finale: 93;  
    inițiale: 93;  
constanta de cuplare:  
    a gluonilor,  $g$ : 149;  
    dintre un  $W$  și un miuon: 156;  
     $j$ : 133, 142, 154;  
    măsurată pentru  $W$ -uri: 153;  
cristal:  
    de nichel: 96;  
    de sare: 59;  
cromodinamică cuantică: 144, 151;

cronometru imaginar: 36, 114-6;  
 cuantică:  
     comportarea în maniera  
         mecanicii: 97;  
     cromodinamica: 144, 151;  
     electrodinamica: *a se vedea* elec-  
         trodinamică cuantică, teoria;  
     fizica: 68, 90, 159;  
     ideile mecanicii: 15, 17, 51;  
     teoria:  
         calcularea probabilităților  
             în cadrul: 33;  
         a electricității și magne-  
             tismului: 18;  
         a gravitației: 162;  
         a interacțiunilor tari: 144;  
 „culoare“:  
     gluonilor: 149;  
     quarkurilor: 149;  
 culori: 42, 127;  
 cunoaștere precisă: 68;  
 cuplare:  
     amplitudinea corespunzătoare:  
         104;  
     determinată experimental, con-  
         stanta de: 141;  
     triplă: 153;  
     unui quark *d*: 159;  
 curenți neutri: 153;

*d*, quarkul: 144-53, 155-6, 159, 161;  
 Davisson, C. J.: 96;  
 De Broglie, Louis: 96;  
     formula lui: 96;  
 dezintegrare beta: 151, 155-6;  
 diagrame: 131;  
 diferența de timp: 101;  
 difracție:  
     printr-o mică deschizătură: 65-8;  
     rețea de: 56-9, 70;  
 dinamită, explozia: 143;

Dirac, Paul: 17, 111, 129;  
     teoria lui: 18;  
 drum(uri):  
     bine definite: 96;  
     corespunzător timpului minim:  
         63;  
     învecinate: 56, 64-6, 135;  
     în linie dreaptă: 64-6;  
 dualismul undă-corpusul: 33, 47;  
  
 E(de la A la B), formula pentru: 103;  
 eclipse de lună: 21;  
 Eddington, Arthur: 142;  
 Einstein, Albert: 124;  
     Teoria Relativității: 16, 99, 101;  
 electricitate și magnetism:  
     teoria cuantică a: 18;  
     teoria lui Maxwell privind: 17;  
 electrodinamică cuantică, teoria:  
     caracteristica șocantă a: 137;  
     experimente pentru testarea: 19;  
     precizia: 18;  
     structura: 143;  
     trăsătura nesatisfăcătoare a: 163;  
 electron(i):  
     artificial: 103;  
     caracteristica ondulatorie  
         asociată: 96;  
     care se deplasează înapoi în  
         timp: 110;  
     cu spin 0: 126;  
     despre materie, teoria: 16;  
     încă și mai greu: 158, 159;  
     mișcarea: 135;  
     momentul magnetic al: 18, 129,  
         132;  
     neutrینul corespunzător: 156;  
     polarizarea: 133;  
     schimbând fotoni: 112, 146;  
     teoria relativistă a: 17;  
     tipare de: 143;

electron-pozitron, pereche: 139, 155;  
 energii negative: 141;  
 eveniment(e):  
     analizând: 86;  
     compuse: 71;  
     observat în natură: 95;  
     probabilitatea unui: 48, 75;  
     suspecte: 163;  
 Excluziunii, Principiul: 126;  
 experiment(e):  
     de laborator: 130-1;  
     la energii înalte: 143;  
     la energii joase: 144;  
     lui Newton, rezultatele: 33;  
     pentru măsurarea reflexiei: 37;  
  
 F(de la A la B), formula pentru: 100-1;  
 fata-morgana: 62;  
 fenomen(e):  
     acustice: 16;  
     cele mai simple: 95;  
     cerești: 21;  
     de la nivel atomic: 17;  
     din natură: 95;  
     familiare: 26, 48;  
     legate de radioactivitate: 19;  
     mecanice: 16;  
     nucleare: 19, 89;  
     optice: 59;  
     pe care le descrie QED: 19;  
     termice: 16;  
 filosofice, îndoieli: 137;  
 finale, condiții: 93;  
 fizic(ă):  
     lumea: 19;  
     poziționare: 119;  
 fizică:  
     clasică: 135;  
     cuantică: 68, 90, 159;  
     este probabilistică: 28;  
     nucleară: 19;

stării lichide: 129;  
 stării solide: 129;  
 studenți de la: 20;  
 teoretică: 95;  
 fizician teoretician: 141, 159;  
 focalizantă, lentilă: 26, 70, 121;  
 formula:  
     lui De Broglie: 96;  
     pentru E(de la A la B): 103;  
     pentru F(de la A la B): 100, 103;  
 forță(e):  
     electrică: 127, 145, 162;  
     gravitațională: 162;  
     nucleare: 143;  
 fotografice, plăci: 23;  
 fotomultiplicator: 24;  
 foton(i): 24, 47;  
     care ricoșează: 37;  
     care să se împartă: 92;  
     emis: 154;  
     identici: 28;  
     incident: 114;  
     pentru lumină, modelul: 124;  
     reflectat: 40-1;  
     schimb(uri) de: 107, 112, 120, 127, 148;  
     singular, detectarea unui: 24;  
     virtual: 107, 133;  
     W-uri și, legătura dintre: 153;  
 Franklin, Benjamin: 144-5;  
  
 gamma, raze: 23;  
 gălbui, dungi: 44;  
 găuri și petice, teoria cu: 28;  
 Gell-Mann, Murray: 144;  
 Germer, L. H.: 96;  
 gluon(i): 145-50;  
     constanta de cuplare a: 147, 149;  
     „culoarea”: 149;  
     quarkuri schimbând: 146;  
     teoria: 149-50;

gravitație:  
    teoria: 16;  
    teoria cuantică a: 162;  
graviton: 162;  
grecii antici, punctul de vedere al: 73;

Hanbury-Brown-Twiss, efectul: 86;  
holograme: 59;

*I* („intervalul“): 100-1;  
idei:  
    demodate: 68;  
    mecanicii cuantice: 15, 17;  
    revoluționare: 68;  
Incertitudinii, Principiul: 68;  
incidență, unghiul de: 49;  
indienii Maya: 21;  
infiniți: 140, 162;  
inițială, stare: 95;  
inițiale, condiții: 93;  
interacțiune(i):  
    cu schimbarea „culorii“: 149;  
    electrice: 153;  
    luminii cu materia, teoria: 16;  
    slabe: 153;  
    tari: 148, 153;  
    tipuri de: 153;  
interferență:  
    culori de: 42;  
    efectul de: 93;  
    principiul: 93-4;  
interval, *I*: 100-1;  
iraționale, numere: 75;  
iridiscentă: 44;  
istoria fizicii: 17;

împrăștiere: 114, 117-9;  
înțelegere: 20-1;

*j*: 104, 133-4, 138-42, 154;  
    valoarea lui: 104;  
joncțiune, numărul *j* corespunzător:  
    104, 133-4, 138-42, 154;

lambda, particula: 144;  
lasere: 124;  
legi:

    lui Newton: 17;  
    mecanicii: 16;  
    Naturii: 99;

lentilă convergentă: 26, 70, 121;  
linie ondulată: 99, 104, 108, 119;  
litiul metalic conducând curentul  
    electric: 127;

lume:  
    atât de complexă: 127;  
    fizică: 19;  
lumină: 23, 32;  
    albastră: 44;  
    albă: 44, 115;  
    infraroșie: 23;  
    în apă și în aer, viteza: 61;  
    în situațiile de zi cu zi: 26;  
    modelul fonic al: 124;  
    monocromatică foarte slabă: 47;  
    particule de: 47;  
    slabă: 24;  
    ultravioletă: 23, 160;  
    viteza *c* a: 99, 101-2;

*m* și *e*, valorile determinate experi-  
    mental ale: 140;  
magic, număr: 109, 142;  
magnetic(e):  
    câmp: 111, 129, 135;  
    interacțiuni: 143;  
maniere alternative: 48, 70, 75, 90, 95;



- masă(e):  
     miuonului: 154;  
     numărul corespunzător: 144;  
     observată experimental ( $m$ ): 163;  
     particulelor mai grele: 156;  
     quarkului  $t$ : 159;  
     unui tau: 158;  
     valoarea calculată experimental  
         a ( $n$ ): 140;  
     W-urilor: 152;  
 matematicieni: 75;  
 material:  
     opac: 123;  
     reflectător: 28;  
 materie, teoria electronică a: 16;  
 Mautner, Alix: 15;  
 Maxwell, James Clerk: 16;  
     teoria lui: 17;  
 Maya, indienii: 21;  
 mecanice, fenomene: 16;  
 MeV: 144;  
 mezoni: 144;  
 miu-neutrino: 156;  
 miuon: 154-6;  
     cuplarea dintre W și: 156;  
     masa: 154;  
 miuon-antimiuon, pereche: 154, 155;  
 momentul magnetic:  
     al electronului: 18, 129, 132;  
     al neutronului: 143;  
     al protonului: 143, 150;  
 monocromatică, sursă: 114-5, 117;  
  
 $n$  și  $j$ , valorile calculate ale lui: 138;  
 natură:  
     analizarea: 90;  
     comportarea stranie a: 91;  
     eveniment observat în: 95;  
     fenomen din: 95;  
     legile: 99;  
     particulă din: 111;  
     varietate vizibilă în: 124;  
  
 neutrino corespunzând electronului: 156;  
 neutroni: 143;  
 neutru(i):  
     curenți: 153;  
     W: 153;  
 Newton, Sir Isaac: 17, 23-4, 27-8, 31-2, 47, 97;  
 Noua Zeelandă: 15;  
 nuclear(e):  
     fenomene: 19, 89;  
     fizică: 19;  
     forțe: 143;  
     particule: 20, 143;  
     reactoare: 151;  
 nucleu: 16;  
     atomic: 18;  
     schimbând fotoni, protoni aflați  
         în același: 126;  
 număr (numere):  
     caracteristic joncțiunii ( $j$ ): 104;  
     complexe: 75;  
     corespunzător masei ( $m$ ): 144;  
     iraționale: 75;  
     misterios: 139, 142, 146;  
      $m$  și  $e$ : 139-41;  
      $n$  și  $j$ : 138-42;  
  
 ochiul uman: 24;  
 oglindă: 26, 49;  
     scrijelită: 56;  
 ondulatorie:  
     asociată electronilor, caracte-  
         ristica: 96;  
     a reflexiei parțiale, teoria: 33;  
 opac, material: 123;  
 optice, fenomene: 59;  
 orificii mici: 90-1, 96;

particulă(e):

comportarea luminii ca: 24-5;  
cu spin  $1/2$ : 134, 144, 152;  
cu spin 1: 146, 152;  
de lumină: 47;  
din natură: 111;  
fundamentale: 144, 156, 162;  
individuale: 150;  
intermediară: 151;  
nedescoperită: 161;  
nucleare: 20, 143;  
repetarea: 157;  
staționară: 113;

parțială, reflexie: 26-33, 47, 56, 75, 78, 81, 83, 86, 89, 114-21;

culori produse prin: 42;  
dependența de grosimea sticlei: 31, 44;  
pe două suprafețe: 33;  
pe mai multe suprafețe: 32;  
teoria ondulatorie pentru: 33;  
teorii sugerate pentru: 27-8;

pași succesivi: 75, 79, 95;

pătrat:

unei amplitudini: 48;  
valoarea absolută a: 75;

păuni: 44;

pereche(i):

miuon-antimiun: 154, 155;  
pozitron-electron: 130, 132, 139, 154, 155;  
quark-antiquark: 150;

pick-up, disc de: 58;

pioni: 143;

Pitagora: 42;

polarizare: 23, 133-4;

electronilor: 133;  
fotonilor: 134;

potențial electromagnetic:

scalar: 135;  
vectorial: 135;

poziție, poziționare:

fizică: 119;  
relativă: 124;

pozitron: 111;

pozitron-electron, perechi: 130, 132, 154;

predicții absolute: 34;

probabilitate (probabilități):

amplitudinea: 42, 48;  
calcularea: 90;  
ca pătrat al unei amplitudini: 34, 48;  
unui eveniment: 48, 75;

proton(i): 143;

schimbând fotoni: 126;

teoria neutronilor și: 150;

valoarea determinată experimental a momentului magnetic al: 150;

protoni-neutroni, tipare: 143;

psi, mezonul: 156;

puncte de cuplare: 140;

QED: 15;

quark(uri):

„aroma”: 146;

*b*: 159;

*c*: 159;

„culoarea”: 149;

cu un *W*, cuplarea unui: 159;

*d*: 144-53, 155-6, 159, 161;

mai grele: 156;

produse ca particule individuale: 150;

*s*: 156, 159;

schimbând gluoni: 146;

*t*: 159, 161;

*u*: 144-52, 156, 159, 161;

quark-antiquark, pereche: 150;

Rabi, I. I.: 157;

radio, unde: 24, 44, 86;

- radioactivitate, fenomene legate de: 19;  
 raze:  
     gamma: 23, 44, 86;  
     ultraviolete: 160;  
     X: 23, 44, 59, 96, 160;  
 reacții chimice: 127;  
 reducerea unui pachet de unde: 87;  
 reflectător, material: 28;  
 reflexie:  
     parțială: *a se vedea* parțială,  
     reflexie;  
     pe fața inferioară: 36, 71, 78;  
     pe fața superioară: 36, 71, 78;  
     săgeata: 36-42;  
 refracție: 61;  
 reguli:  
     care eșuează: 96;  
     ciudate: 90;  
     pentru calculele cuantice: 48;  
 relativistă, teoria electronică: 17;  
 relativitate:  
     Principiul: 134;  
     teoria lui Einstein: 16, 99, 101;  
 renormalizare: 141;  
 repetarea particulelor: 157;  
 rețea de difracție: 56-9, 70;  
 rho, mezonul: 144;  
 rotire(i):  
     jumătate de: 38, 40, 77;  
     succesive: 80;  
 s, quarkul: 156, 159;  
 săgeată (săgeți):  
     adunarea (sumarea vectorială a):  
         34, 63, 68, 94;  
     amplitudinii: 79;  
     compunerea: 95, 97, 137;  
     desenarea: 48;  
     de la transmisie: 82;  
     finală: 71;  
     identice: 126;  
     înmulțirea: 74;  
     reflexiei: 36-42;  
     reprezentând probabilități: 35;  
     unitate: 71-6, 79-80, 93;  
 Salam, Abdus: 153;  
 sarcină:  
     electrică: 96;  
     quarkurilor: 145;  
     valoarea calculată a: 140;  
     valoarea determinată  
         experimental a: 140;  
 sare, cristalul de: 59;  
 schimb(uri) de fotoni: 107, 112, 120,  
     127, 148;  
 Schwinger, Julian: 18, 128, 140;  
 segment(e):  
     înmulțirea: 74;  
     unitate: 74;  
 semnale de televiziune: 24;  
 sigma, particulele: 144;  
 sodiu:  
     atomi de : 59;  
     lămpi de pe stradă cu vapori  
         de: 44;  
 solare, sisteme: 96;  
 spațiul tridimensional: 101;  
 spațiu-timp: 97-9, 111, 125;  
     diagrame: 119, 120;  
     grafic: 99;  
 spin: 134;  
 spin 0:  
     electron cu: 126;  
     particule cu: 105;  
 spin 1, particule cu: 146, 152;  
 spin 1/2, particule cu: 134, 144, 152,  
     157-8, 160;  
 spin 2, particule cu: 134;  
 spin 3/2, particule cu: 162;  
 sticlă:  
     împrăstieri în: 120;  
     lamă foarte subțire de: 29, 42;  
     lamă mai groasă de: 39, 119;  
     parțial opacă: 121;  
     transparentă: 121;

- subevenimente:
  - concomitente: 105;
  - din ce în ce mai simple: 95;
- succesivi(e):
  - pași: 75, 79, 95;
  - rotiri: 80;
  - transformări: 73, 75;
- suprafață (suprafețe):
  - inferioară: 119, 120;
  - reflexia parțială pe două sau mai multe: 29;
  - striată: 58, 59;
  - superioară: 119, 120;
  - transmisia printr-o: 27;
- t*, quarkul: 159, 161;
- tau, masa unui: 158;
- televiziune, semnale de: 24;
- Teorema lui Pitagora în trei dimensiuni: 101;
- teorie(i):
  - asemănarea diverselor: 160;
  - cuantică: *a se vedea* cuantică, teoria;
  - cuantică a gravitației: 162;
  - cu găuri și petice: 28;
  - electrodinamicii cuantice: *a se vedea* electrodinamică cuantică, teoria;
  - electronică a materiei: 16;
  - gluonilor: 149-50;
  - gravitației: 16;
  - interacțiunii luminii cu materia: 16;
  - interacțiunilor slabe și electromagnetice: 153;
  - interacțiunilor tari: 150;
  - lui Dirac: 18;
  - lui Maxwell: 17;
  - mecanicii cuantice: 17;
  - relativistă a electronului: 17;
  - relativității: 16, 99, 101;
  - speculative: 161;
  - undelor: 33;
  - unificarea: 161;
  - W-urilor: 153;
- termice, fenomene: 16;
- timp:
  - curbă a: 69;
  - diferența de: 101;
  - minim, drumul corespunzând: 63;
  - pe axa verticală, momentul de: 97;
  - scara: 100;
- tipare:
  - de electroni: 143;
  - protoni-neutroni: 143;
- Tomonaga, Sin-Itiro: 18, 140;
- traectorie(i): *a se vedea* drum(uri);
- transformări succesive: 73, 75;
- transmisie:
  - printr-o suprafață: 27;
  - săgeata de la: 82;
- transparente, materiale: 123, 127;
- u*, quarkul: 144-52, 156, 159, 161;
- ulei, peliculă de: 42, 44;
- ultravioletă, lumina: 23, 160;
- undă-corpusul, dualismul: 33, 47;
- unde:
  - electromagnetice: 16;
  - radio: 24, 44, 86;
  - reducerea unui pachet de: 87;
  - teoria: 33;
- unghi:
  - de incidență: 49;
  - relativ: 39, 43;
- unificarea teoriilor: 161;
- unificată, teoria interacțiunilor slabe și electromagnetice: 153;

valoare (valori):  
    determinate experimental ale  
        lui  $m$  și  $e$ : 140;  
        lui  $j$ : 104;  
vectoare, raze: 120;  
Venus: 21;  
virtual, foton: 107, 133;

W-uri: 151-6, 159, 161;  
    cuplarea: 153, 156, 159;  
    masa: 152;  
    și fotoni, legătura dintre: 153;  
    tipuri de: 153;

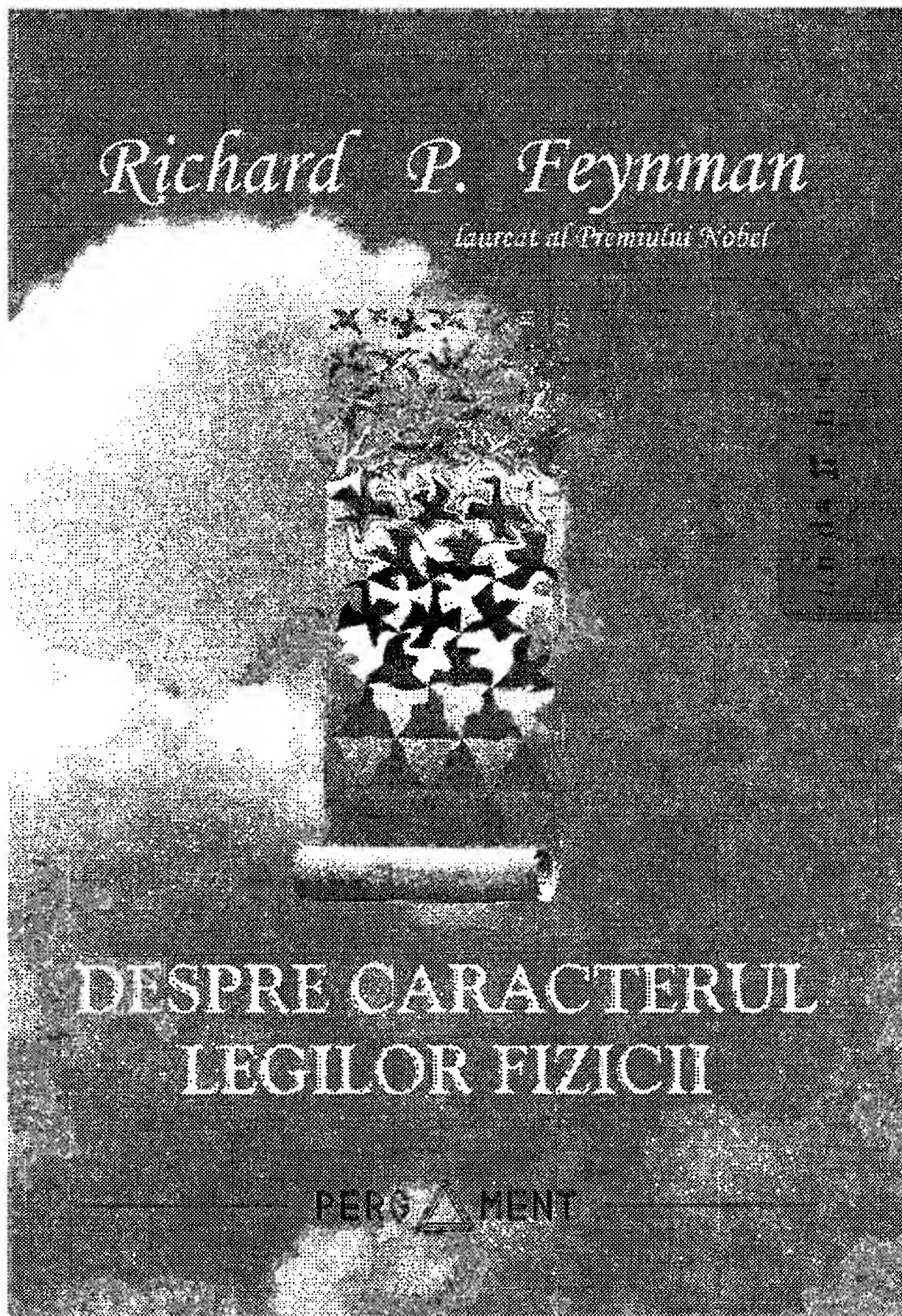
X, razele: 23, 44, 59, 96, 160;

Weinberg, Stephen: 153;  
Weisskopf, Victor: 140;

Z, particula: 153.



De același autor, în cadrul colecției *fundamental* a mai apărut:



Richard P. Feynman face parte din acei foarte puțini fizicieni care, în ultimele trei-patru decenii, și-au câștigat un loc binemeritat alături de clasici. Însă, pe deasupra, profesorul Feynman este cel care a știut ca nimeni altul să explice pe înțelesul tuturor cele mai abstracte și mai subtile aspecte ale fizicii.

Să pătrundem în marea aulă a prestigioasei universități americane Cornell, pentru a urmări „pe viu” o serie de prelegeri nu *de*, ci *despre* fizică. Transcrierea lor reproduce cu fidelitate înregistrarea realizată cu această ocazie de televiziunea BBC, fără alte retușuri ulterioare, tocmai din dorința de a păstra pe cât posibil nealterată savoarea spectacolului de la catedră.







Să urmărim o nouă serie de prelegeri susținute de profesorul Richard P. Feynman la o altă prestigioasă universitate americană, UCLA (University of California, Los Angeles). După ce în precedentul volum ne-a vorbit *Despre caracterul legilor fizicii*, marele om de știință își propune de această dată să ne prezinte în mod riguros cea mai amplă și mai de

succes teorie fizică de până acum, electrodinamica cuantică (sau, pe scurt, *QED*). Cu doar două excepții (gravitația și reacțiile nucleare tari), electrodinamica cuantică explică absolut toate fenomenele fizice observate în jurul nostru și, prin extindere, pe cele chimice și biologice. Vom avea deosebita satisfacție/oroare să constatăm că până și cele mai elementare lucruri, de adevărul cărora eram convinși încă de pe băncile școlii, nu sunt decât simple aproximări ale percepției omenești: lumina nu se propagă pe vreo traiectorie anume (fie ea în linie dreaptă sau altcumva); lumina nu se propagă cu vreo viteză anume (fie ea 300.000 km/s sau altcâtva); particulele din care spunem că este alcătuită lumea, precum electronii ori fotonii, nu sunt ceea ce înțelegem îndeobște prin cuvântul *corpuri* (sau prin cuvântul *undă*, sau prin orice alt cuvânt inventat vreodată de om). Și pentru ca spectacolul să fie complet, toate demonstrațiile sunt făcute fără a apela la ecuații matematice.

ISBN 978-973-85481-2-1

Lei 20



9 789738 548121

